



Universidade de Aveiro
2009

**Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática**

**João Miguel
Sarabando Santos**

**FBGs avançadas para sistemas de comunicação em
fibra óptica**



Universidade de Aveiro
2009

**Departamento de Electrónica,
Telecomunicações e Informática**

**João Miguel
Sarabando Santos**

**FBGs avançadas para sistemas de comunicação em
fibra óptica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Mário Lima, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Doutor Rogério Nogueira, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações.

o júri

presidente

Prof. Dr. José Rodrigues Ferreira da Rocha

Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Dr. Henrique Manuel de Castro Faria Salgado

Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. Mário José Neves de Lima

Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Doutor Rogério Nunes Nogueira

Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao Professor Mário Lima e ao Doutor Rogério Nogueira pela orientação e pela disponibilidade que demonstraram ao longo de todo o projecto.

Agradeço também ao Miguel Drummond pela preciosa ajuda na compreensão de algumas matérias e na orientação a certa altura do trabalho.

Agradeço também ao Carlos Marques pela gravação de redes.

Gostaria também de agradecer a todos os amigos e colegas de universidade. O agradecimento final vai para a família, com especial relevância para os pais, irmã, e para a Sara.

palavras-chave

Redes de Bragg em fibra óptica, desenho, simulação, gravação, método de *stitching*, *layer pelling*, caracterização.

resumo

Iniciou-se este trabalho com o estudo das redes de Bragg em fibra óptica, propriedades espectrais e espaciais, identificando os seus principais parâmetros físicos e o impacto que estes têm na sua resposta em amplitude e fase. Coincidente com esta fase, desenvolveu-se um algoritmo de simulação de redes Bragg baseado no método da matriz de transferência, com o objectivo de uma melhor compreensão das redes Bragg em fibra óptica. De seguida, procedeu-se ao estudo do sistema de gravação implementado no *Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro* e dos algoritmos já desenvolvidos, com especial atenção para um algoritmo de implementação de redes de Bragg através do método de *stitching*. De seguida, iniciou-se o desenvolvimento do *software*. Efectuaram-se simulações, projecto e gravações de redes Bragg e compararam-se as respostas das redes Bragg gravadas com as simuladas. Finalmente, caracterizaram-se e analisaram-se algumas redes de Bragg implementadas, utilizando um simulador de sistemas de comunicações ópticas.

keywords

Fiber Bragg Gratings, design, simulation, recording, stitching method, layer pelling, characterization.

abstract

This work started with the study of the Fiber Bragg Gratings and their spectral and spatial properties, as well as the identification of the main physical parameters associated and their impact in the amplitude and phase response. Simultaneously, a FBG simulation algorithm was developed based on the transfer function method, for a better understanding of the FBGs characteristics. Then, we proceed to the study of the recording system at the Instituto de Telecomunicações - Pólo de Aveiro, as well as the study of the developed algorithms, with particular attention to an implementation algorithm considering the stitching method. The development of the software followed. Several simulations, designs and FBG recordings were performed and the responses of the recorded FBGs were compared to the expected ones. Finally, a number designed FBGs were characterized and tested, using an optical communication system simulator.

Glossário de acrónimos

CFBG	Chirped Fiber Bragg Grating	Redes <i>aperiódicas</i>
FBG	Fiber Bragg Grating	Rede de Bragg em fibra óptica
FF	Formatador Filter	Filtro Formatador
FPBx	Low-pass Filter	Filtro passa-baixo
FWHM	Full Width at Half Maximum	Largura a meia altura
MZI	Mach-Zehnder Interferometer	Interferómetro de Mach-Zehnder (modulador electroóptico)
NRZ	Non Return Zero	Não retorno a zero
PIN	Positive – Intrinsic- Negative	Positivo – Intrínseco – Negativo (fotodíodo)
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence	Sequência de bits pseudo -aleatória
UV	Ultraviolet	Ultravioleta
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem no comprimento de onda

Lista de símbolos

$A_p(z)$	Função de apodização (FBG)
A_k^+	Campo propagante na secção de índice κ (método da matriz de transferência)
B_k^+	Campo contrapropagante na secção de índice κ (método da matriz de transferência)
D	Dispersão da fibra
G	Ganho EDFA
L	Comprimento da rede de Bragg
L_k	Comprimento da secção de índice κ da FBG (método da matriz de transferência)
M	Número de secções (método da matriz de transferência)
m	Ordem de difracção
N_F	Figura de ruído do EDFA
n	Índice de refracção
n_{eff}	Índice de refracção efectivo do núcleo da fibra
n_i	Índice de refracção no meio da onda incidente
n_m	Índice de refracção no meio da onda difractada
$\overline{n_{eff}}$	Valor médio do índice de refracção efectivo numa FBG
Q	Factor de qualidade
R_F	Coeficiente de reflexão (Fresnel)
Step(s)	Equivalente à abertura do <i>slit</i> ; Escolhido pelo utilizador
step(s)	Valor(es) do deslocamento da carruagem de translação
T_k	Matriz de transferência da secção κ (método da matriz de transferência)
$v(z)$	Visibilidade (FBG)

V_F	Velocidade da fibra
V_{MF}	Velocidade da máscara de fase
δ	Parâmetro que relaciona o desfasamento entre o comprimento de onda de propagação e o comprimento de onda de Bragg quando $\overline{\delta n_{eff}} \rightarrow 0$
δn	Alteração / Transição de índice de refração
$\delta n_{eff}(z)$	Variação do índice de refração do modo guiado de uma fibra ao longo do eixo longitudinal (FBG)
$\overline{\delta n_{eff}}$	Variação do valor médio do índice de refração na FBG
Δn	Amplitude de modulação do índice de refração (FBG)
Δz	Desfasamento da carruagem de translação em <i>steps</i>
θ	Desfasamento da carruagem de translação em radianos
θ_b	Ângulo dos planos da perturbação do índice de refração (FBG inclinada)
θ_i	Ângulo da onda incidente
θ_m	Ângulo da onda difractada
κ_{DC}	Influência na propagação do valor médio do índice de refração na rede de Bragg
λ	Comprimento de onda
λ_{Bragg}	Comprimento de onda de Bragg
Λ	Período da perturbação induzida no índice de refração (FBG)
Λ_0	Período à entrada da rede (FBG aperiódica)
Λ_{MF}	Período das depressões da máscara de fase
$\hat{\sigma}$	Relacionado com δ e κ_{DC}
$\phi(z)$	Variação do período (FBG)
φ	Relacionado com κ e com $\hat{\sigma}$
ϕ	Valor do <i>phase shift</i> em radianos

ÍNDICE

O júri

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Glossário de Acrónimos

Lista de símbolos

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura	2
1.4. Contribuições	3
Capítulo 2 – Introdução às redes Bragg	5
2.1. Introdução	5
2.2. Princípio de funcionamento	6
2.2.1. Reflexão de Fresnel.....	7
2.2.2. Redes de difracção em fibra óptica	8
2.3. Propriedades espaciais das redes de Bragg	9
2.3.1. Redes de Bragg uniformes.....	11
2.3.2. Redes de Bragg apodizadas	12
2.3.3. Redes de Bragg aperiódicas	14
2.3.4. Redes de Bragg com deslocamento de fase	16
2.3.5. Redes de Bragg inclinadas	16
2.4. Propriedades espectrais das redes bragg	17
2.4.1. Redes uniformes	17
2.4.2. Redes apodizadas.....	18
2.4.2.1. Redes Sinc	20
2.5. Simulação de redes de Bragg.....	21
2.5.1. Método da matriz de transferência.....	22
Capítulo 3 – Gravação de redes Bragg.....	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Técnicas de gravação.....	27

3.2.1. Gravação por máscara de fase	28
3.2.2. Gravação por interferómetro	29
3.2.2.1. Interferómetro por divisão de amplitude	30
3.2.2.2. Interferómetro com máscara de fase.....	31
3.2.3. Gravação de redes longas	32
3.3. Sistema de gravação implementado.....	33
3.4. Método de <i>Stitching</i>	34
Capítulo 4 – Implementação de FBGs	39
4.1. Introdução	39
4.2. Algoritmo para implementação de FBGs	40
4.2.1. Import / Design do filtro	40
4.2.2. Algoritmo <i>layer pelling</i>	41
4.2.3. Método de <i>Stitching</i>	44
4.3. Simulação da resposta espectral de FBGs.....	45
4.4. Desenho e gravação de FBGs.....	47
4.4.1. Desenho de redes Bragg	47
4.4.2. Gravações e caracterização de redes Bragg	50
4.5. Análise das redes de Bragg implementadas	55
4.5.1. Resposta espectral das redes Bragg desenhadas.....	57
4.5.2. Impacto do número de <i>Steps</i>	60
Capítulo 5 – Considerações finais	63
5.1. Conclusões	63
5.2. Trabalho futuro	64
Apêndice A.....	67
Apêndice B.....	69
Apêndice C	71
Bibliografia	75

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e Motivação

As redes de Bragg em fibra (*FBG, Fiber Bragg Gratings*), devido às suas propriedades e quantidades de parâmetros controláveis, são dispositivos bastante utilizados nos sistemas de comunicações ópticos actuais, nos mais variados dispositivos.

Desde o aparecimento das redes de Bragg que a sua implementação prática tem sido objecto de estudo, pois controlar todas as variáveis envolvidas de forma a obter uma resposta da FBG implementada próxima da resposta ideal é um processo complexo.

Basicamente, uma FBG é uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra ao longo do seu eixo longitudinal, induzida através da exposição de uma fibra fotossensível a um padrão espacial de luz UV, que pode ser obtido de diferentes formas, por interferómetro, por máscara de fase ou por “colagem” de padrões de franjas de interferência. Este último método é o que permite a gravação de FBG mais avançadas, embora seja o mais complexo de realizar. O sistema de gravação de FBGs instalado no IT (*Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro*) inclui um laser de excímeros pulsado que emite em 248nm e é constituído por um conjunto de posicionadores motorizados onde um deles tem uma resolução de 1nm. Todo o processo de alinhamento e gravação é controlado por PC.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho surge no contexto da melhoria da interacção com o sistema de gravação existente no *Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro*.

1.2. Objectivos

O objectivo principal deste trabalho é desenvolver um *software* que interaja com o sistema de gravação existente. Esse *software* tem como entrada a função de transferência do filtro desejado, podendo ser inserido um ficheiro de texto que contenha a função de transferência ou em opção desenhar o filtro utilizando uma funcionalidade desenvolvida, sendo a função de transferência calculada internamente. Como saída tem um ficheiro de texto com os *steps* do estágio de translação, ficheiro necessário ao sistema de gravação.

O sistema é também capaz de simular a respostas das FBGs, podendo-se assim prever o impacto do método de gravação, o que torna possível ajustar alguns parâmetros, em particular o número de secções, de forma a obter melhor resposta.

Os objectivos finais deste trabalho são, projectar e gravar diferentes tipos de FBGs, e caracterização e teste das FBGs implementadas, comparando com as respostas simuladas, concluindo-se assim acerca da operacionalidade da plataforma desenvolvida, nas diferentes vertentes (projecto, simulação, implementação e caracterização)

1.3. Estrutura

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, onde são apresentados diversos aspectos relativos às redes de Bragg em fibra óptica.

O primeiro capítulo destina-se exclusivamente a fazer a apresentação do trabalho em si. São apresentadas as motivações e o enquadramento do trabalho, os principais objectivos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é iniciado o estudo teórico das redes de Bragg em fibra óptica. Começa por ser apresentado de uma forma sucinta o princípio de funcionamento das redes Bragg em fibra óptica, depois são apresentadas as características espaciais e espectrais das redes Bragg e finalmente é apresentado um método de simulação de redes Bragg, método da matriz de transferência.

O terceiro capítulo inicia-se com a apresentação de técnicas de gravação de redes Bragg, são apresentadas as técnicas de gravação por máscara de fase e por interferómetro. É também apresentado no terceiro capítulo o sistema de gravação implementado no *Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro*.

Finalmente é apresentada o método de gravação de redes de Bragg implementado, baseado no método de *stitching*.

No quarto capítulo é explicado o processo de implementação de FBGs, começando por se apresentar o algoritmo desenvolvido para apoio à gravação das redes de Bragg. São apresentadas também neste capítulo algumas simulações de redes Bragg e a forma como essas simulações foram feitas. Na terceira secção do capítulo quatro são apresentados alguns desenhos de redes Bragg e a respectiva gravação. Finalmente na última secção do capítulo quatro, são caracterizadas as redes de Bragg implementadas, comparando a resposta das redes obtidas com a resposta simulada.

No quinto capítulo são apresentadas algumas considerações finais e propostas para trabalho futuro.

1.4. Contribuições

Na opinião do autor, as principais contribuições científicas do trabalho descrito nesta dissertação, podem resumir-se da seguinte forma:

- Desenvolvimento de *software* capaz de através da função de transferência do filtro pretendido, gerar o ficheiro necessário ao sistema de gravação.
- Desenvolvimento de uma interface gráfica acessível à maioria dos utilizadores, tenham estes muita ou pouca experiência em redes de Bragg.
- Síntese de FBGs para aplicações específicas, como é o caso da filtragem WDM.
- Publicação resultante: João Sarabando, Rogério Nogueira and Mário Lima, Support software for the production of FBG with the stitching method. *SEONs*, June 2009.

CAPÍTULO 2 – INTRODUÇÃO ÀS REDES BRAGG

2.1. Introdução

Devido às propriedades das redes Bragg, versatilidade e variedade de parâmetros que se podem controlar e que podem formatar de diversas maneiras as suas características espectrais, desde o seu aparecimento se tem encontrado muitas aplicações para este componente.

As FBGs têm muitas aplicações nos domínios das telecomunicações e são utilizadas em todos os pontos de um sistema de transmissão. Como elementos reflectores no emissor, para obtenção de emissão monomodo com elevada estabilidade. Na transmissão são utilizadas nos amplificadores ópticos, na compensação da dispersão e filtragem. No receptor são utilizadas como filtros e desmultiplexadores.

Também a utilização das FBGs como sensores tem recebido muita atenção quase desde o seu aparecimento. Os sensores baseados em redes de Bragg têm propriedades que os tornam atractivos para aplicações em engenharia civil, biomecânica e indústria aeronáutica.

Neste capítulo são abordados diversos assuntos importantes para a compreensão do funcionamento das redes de Bragg. Este encontra-se subdividido em quatro partes, são elas: princípio de funcionamento, propriedades espaciais, propriedades espectrais e simulação.

2.2. Princípio de funcionamento

Uma rede de Bragg é uma estrutura formada por uma perturbação periódica do índice de refração do núcleo da fibra, isto é, é uma secção de uma fibra na qual o índice de refração efectivo do núcleo foi alterado em intervalos periódicos, possibilitando assim que certos comprimentos de onda sejam transmitidos e outros reflectidos.

A perturbação periódica referida anteriormente pode ser obtida recorrendo a diversos métodos utilizando radiação UV coerente, ou seja, laser. Isto é possível devido a uma característica física inerente às fibras, que é a fotossensibilidade. Ou seja, se uma fibra for sujeita a determinada radiação UV coerente o valor do índice de refração do núcleo é alterado.

Na figura 2.1. está ilustrada a variação do índice de refração numa rede de Bragg em fibra óptica.

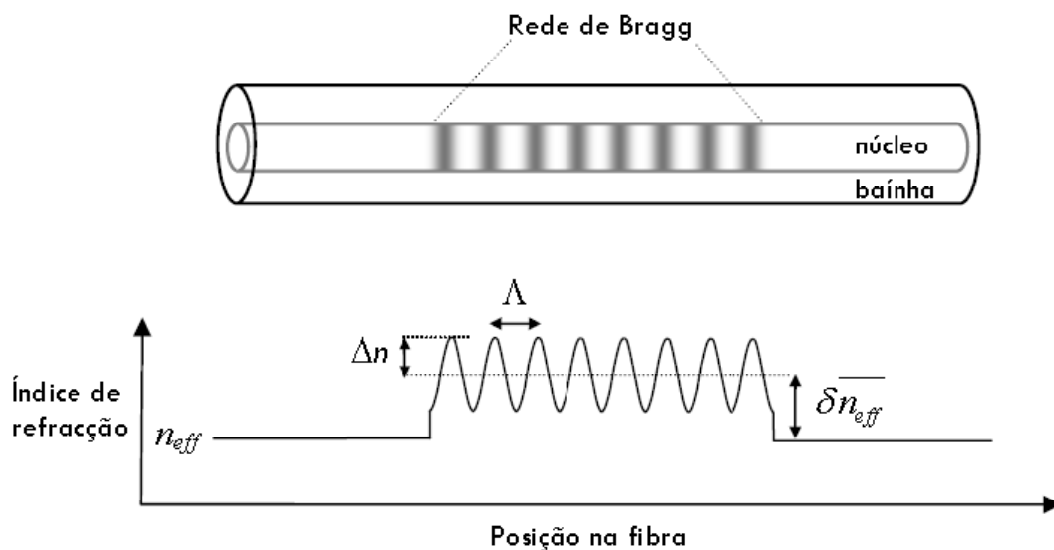


Figura 2.1. Ilustração da variação do índice de refração numa rede Bragg.[1]

Parâmetros presentes na figura:

- n_{eff} – índice de refração efectivo do núcleo da fibra;
- Δn – amplitude de modulação do índice de refração;
- $\bar{\delta n_{eff}}$ – o valor médio do índice de refração da rede;
- Λ – período da perturbação induzida no índice de refração.

2.2.1. Reflexão de Fresnel

Para compreender qualitativamente o efeito de perturbação periódica do índice de refração recorre-se à reflexão de Fresnel. A reflexão de Fresnel ocorre quando uma onda electromagnética atravessa uma interface entre dois materiais dieléctricos com índice diferente. Nessa situação ocorre reflexão de parte da energia da onda electromagnética incidente. Caso a incidência seja normal a reflectividade é dada por:

$$R_F = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.1)$$

n_1 e n_2 representam os índices de refração dos meios envolvidos.

Se se considerar uma pequena transição do índice de refração, δn , existe para cada uma dessas transições uma pequena reflexão de Fresnel. O coeficiente de reflexão para cada uma dessas pequenas reflexões é dado por:

$$R_F = \left[\frac{n - (n_1 + \delta n)}{n + (n_1 + \delta n)} \right]^2 = \left[\frac{\delta n}{2n + \delta n} \right]^2 \quad (2.2)$$

Na figura 2.2. estão ilustradas as reflexões de Fresnel ocorrentes em cada transição de índice.

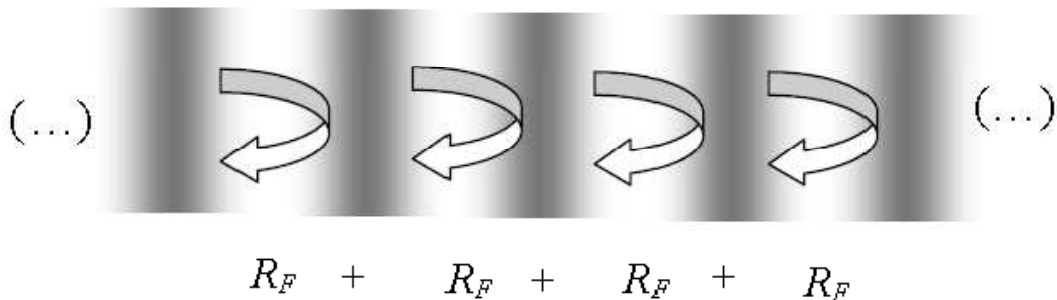


Figura 2.2. Ilustração das reflexões de Fresnel que ocorrem a cada mudança de índice [1]

Numa rede Bragg existem milhares de transições como as ilustradas na figura 2.2. O que torna possível a ocorrência de reflexão total caso as contribuições das reflexões de Fresnel estejam em fase. Para um $\delta n = 10^{-4}$ e $n = 1.45$, obtém-se $R_F \approx 10^{-9}$.

As condições em que esta situação de acoplamento ocorre podem ser entendidas de forma qualitativa utilizando a teoria das redes de difracção em fibras ópticas.

2.2.2. Redes de difracção em fibra óptica

Uma rede de difracção é uma estrutura de fase ou amplitude cujas dimensões são extensas quando comparadas com o período de modulação. Na figura 2.3. está representada a difracção de uma onda electromagnética por uma rede de difracção.

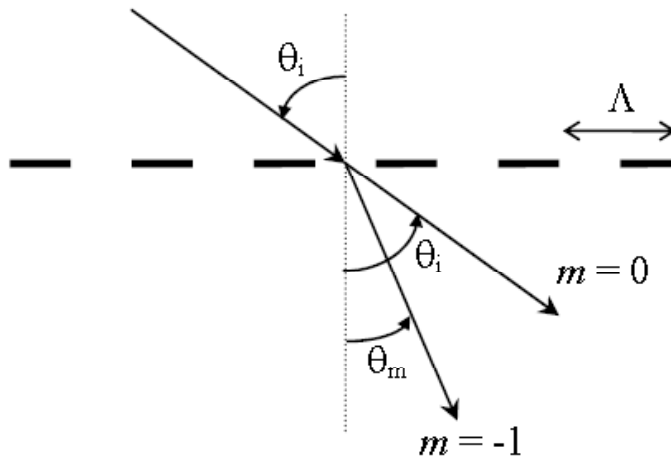


Figura 2.3. Difracção de uma onda electromagnética por uma rede de difracção [1]

As redes de difracção em fibra óptica obedecem as mesmas leis que as redes de difracção em espaço livre. Assim, o efeito causado por uma rede de difracção numa onda electromagnética com ângulo de incidência θ_i pode ser descrito pela equação 2.3 (equação das redes de difracção):

$$\Lambda(n_m \sin \theta_m - n_i \sin \theta_i) = m\lambda \quad (2.3)$$

Na equação 2.3, θ_m representa o ângulo da onda difractada, n_i e n_m representam respectivamente os índices de refacção dos meios das ondas incidente e refractada, m representa a ordem de difracção e λ o comprimento de onda incidente.

A equação 2.3 permite apenas calcular os ângulos θ_m para os quais ocorrem máximos de interferência construtiva. No caso de se tratar de uma rede de

difracção em fibra pode servir para calcular o comprimento de onda que permite acoplar luz entre dois modos.

Pode-se classificar as redes de difracção em fibra óptica em quatro tipos, redes de Bragg, redes de período longo, conversores modais e conversores de polarização. De salientar que todas as redes de difracção em fibra óptica exibem o efeito de Bragg. No entanto rede de Bragg é uma designação referente às redes de difracção em fibra óptica nas quais o acoplamento é efectuado para os modos guiados na direcção de contrapropagação.

Numa rede de Bragg em fibra óptica monomodo, a propagação é efectuada perpendicularmente aos planos de índice da rede, verifica-se portanto a seguinte relação, $\theta_i = -\theta_m = \pi/2$. Considerando então esta situação e uma difracção de primeira ordem, $m = -1$, pode-se simplificar a equação 2.3 e obter a seguinte:

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.4)$$

onde n_{eff} representa o índice de refracção efectivo da fibra. A expressão 2.4 é designada por Condição de Bragg.

Da expressão 2.4 pode-se então concluir que o comprimento de onda de Bragg é dependente tanto do período da rede de difracção como do índice de refracção efectivo associado ao modo guiado pela fibra, isto é, é dependente dos índices de refracção do núcleo e da bainha da fibra. Logo, o comprimento de onda de Bragg será função de todas as grandezas físicas que permitam alterar os parâmetros anteriores.

2.3. Propriedades espaciais das redes de Bragg

Uma rede de Bragg é uma estrutura baseada na variação do índice de refracção do modo guiado de uma fibra ao longo do seu eixo longitudinal, como já foi referido anteriormente.

Essa variação do índice de refracção do núcleo ao longo do eixo longitudinal pode ser descrita matematicamente pela expressão 2.5:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) + A_p(z) \cdot f\left[\frac{\Lambda(z)}{\cos(\theta_b)}, z\right] \quad (2.5)$$

onde $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ representa a variação do valor médio da modulação, $A_p(z)$ a amplitude e o valor médio de modulação, isto é, apodização, e $f\left[\frac{\Lambda(z)}{\cos(\theta_b)}, z\right]$ é a função que representa o perfil de modulação, onde $\Lambda(z)$ representa o período de modulação e θ_b representa o ângulo no caso de a rede Bragg ser inclinada.

No que diz respeito a técnicas de gravação de redes Bragg, a sua grande parte recorrem a interferência óptica. Portanto, de uma forma geral, quanto maior o tempo de exposição maior será amplitude de modulação, e como consequência maior é o valor médio do índice de refração. Pode-se então obter a seguinte expressão para descrever a amplitude e o valor médio de modulação:

$$A_p(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \cdot v(z) \quad (2.6)$$

onde $v(z)$ representa a visibilidade das franjas de interferência e é dependente da qualidade de interferência óptica, ($0 \leq v(z) \leq 1$).

Utilizando este método para gravação de redes, obtém-se um perfil de modulação com características sinusoidais. Portanto a variação do índice de refração de grande parte das redes de Bragg pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$\delta n_{eff} = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + v(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2.7)$$

onde $\phi(z)$ representa a variação do período ao longo da rede, z representa a distância de entrada da rede, $v(z)$ é a visibilidade do índice de refração e Λ o período da rede.

Da equação 2.7 verifica-se que a visibilidade apenas altera a amplitude de variação do índice de refração, não alterando portanto o valor médio deste. Na figura 2.4. estão representadas três simulações de redes de Bragg para três valores diferentes de visibilidade.

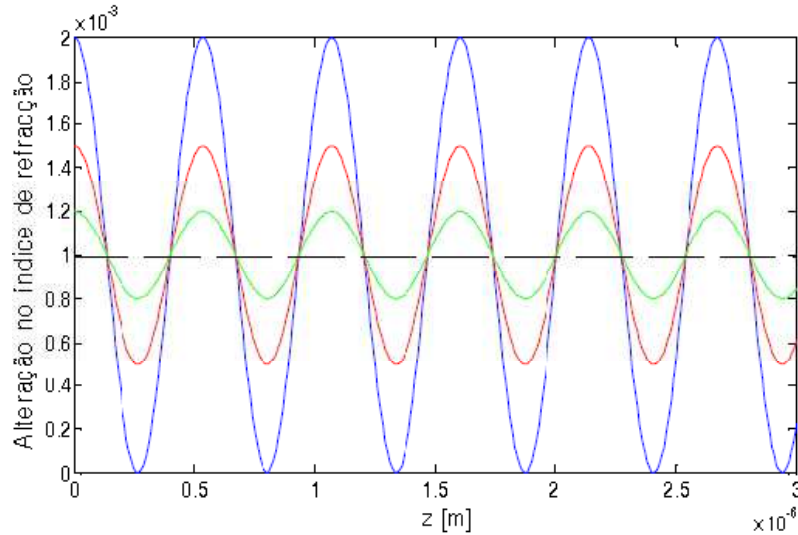


Figura 2.4. Simulação de redes de Bragg para valores diferentes de visibilidade, $v = 1$ (azul), $v = 0.5$ (vermelho), $v = 0.2$ (verde). [1]

Como se pode observar na figura 2.4. alterando a visibilidade apenas se altera a amplitude de variação do índice de refração, permanecendo o valor médio igual, o valor médio está representado a tracejado.

A principal vantagem das redes de Bragg é a flexibilidade de parâmetros com que pode ser desenhada. Variando esses parâmetros podem obter-se redes de Bragg com diferentes características espaciais, nas subsecções seguintes são abordadas as classificações das redes de Bragg quanto à sua variação espacial.

2.3.1. Redes de Bragg uniformes

As redes de Bragg uniformes são as redes mais simples de todas, as propriedades espaciais deste tipo de redes mantêm-se constantes ao longo de toda a sua extensão longitudinal. Isto é, $\phi(z)$, $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ e $v(z)$ são constantes e independentes de z . Na figura 2.4. são ilustradas esse mesmo tipo de redes. Na figura 2.5. está ilustrado o espectro de reflexão de uma rede uniforme.

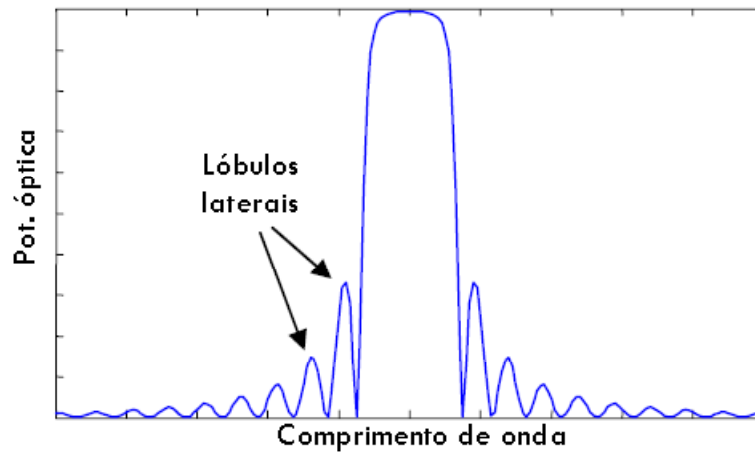


Figura 2.5 Espectro de reflexão de uma rede de Bragg Uniforme. [1]

Nas redes de Bragg uniformes podem-se no entanto controlar a reflectividade e a largura de banda, variando para isso a amplitude de modulação e o comprimento da rede. As redes de Bragg uniformes apresentam como vantagem a simplicidade de gravação, no entanto o espectro de reflexão deste tipo de redes apresenta lóbulos laterais com amplitudes elevadas, como pode ser visto na figura 2.5, o que se traduz numa enorme desvantagem, pois em comunicações ópticas favorecem a existência de diafonia entre canais ópticos muito próximos no comprimento de onda.

O aparecimento dos lóbulos laterais referenciados anteriormente deve-se às fronteiras abruptas entre as redes de Bragg e a fibra, o que origina um efeito semelhante às cavidades de Fabry-Perot.

As redes de Bragg uniformes podem no entanto ser a melhor solução para implementação de sensores devido à sua simplicidade de implementação.

2.3.2. Redes de Bragg apodizadas

Os lóbulos laterais presentes no espectro de reflexão das redes de Bragg uniformes podem ser substancialmente reduzidos se nas extremidades de rede o índice de refração iniciar e terminar de uma forma gradual. A esta técnica dá-se o nome de apodização.

Na equação 2.7, a variação dos parâmetros $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ e $v(z)$ permitem controlar a apodização, $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ está directamente relacionado com o tempo de exposição e $v(z)$ está directamente relacionado com a visibilidade das franjas ópticas. Esta técnica apresenta uma desvantagem, que é o facto haver variação do valor médio da modulação, o que origina uma resposta espectral

assimétrica. A apodização ideal consiste em manter o valor médio da apodização constante e variar apenas a visibilidade das franjas. A este tipo de apodização dá-se o nome de redes com compensação DC.

Os perfis mais comuns de apodização são formulados do seguinte modo:

- Perfil Tangente Hiperbólica:

$$A(z) = \frac{\tanh \left\{ P \left[1 - \left| \frac{z - L/2}{L} \right| \right] \right\}}{\tanh(P)} \quad (2.8)$$

- Perfil Seno

$$A(z) = \sin \left(\frac{\pi z}{L} \right) \quad (2.9)$$

- Perfil Coseno Elevado:

$$A(z) = \frac{1 + (1 + P) \cos \left(\frac{2\pi(z - L/2)}{L} \right) + P \cos \left(\frac{4\pi(z - L/2)}{L} \right)}{2(1 + P)} \quad (2.11)$$

- Perfil Blackman:

$$A(z) = \frac{1 + (1 + P) \cos \left(\frac{2\pi(z - L/2)}{L} \right) + P \cos \left(\frac{4\pi(z - L/2)}{L} \right)}{2(1 + P)} \quad (2.11)$$

- Perfil Gaussiano de Ordem Elevado:

$$A(z) = \exp \left\{ - \left[2(\ln 2)^{1/P} \left(\frac{z - L/2}{FWHM} \right) \right]^P \right\} \quad (2.12)$$

Nas expressões anteriores, L representa o comprimento da rede, P um parâmetro ajustável de acordo com o tipo de apodização pretendida, e $FWHM$ a largura total a meia altura do perfil de apodização.

Os valores típicos de P são: $P=4$ para o perfil tangente hiperbólica, $P=0.19$ para Blackman e $P=2$ para perfil gaussiano de segunda ordem. Para o perfil coseno elevado o parâmetro $FWHM$ é geralmente truncado a L , no caso do perfil gaussiano o parâmetro $FWHM$ é geralmente truncado a $L/3$.

Na figura 2.6. estão ilustrados os perfis de modulação definidos anteriormente.

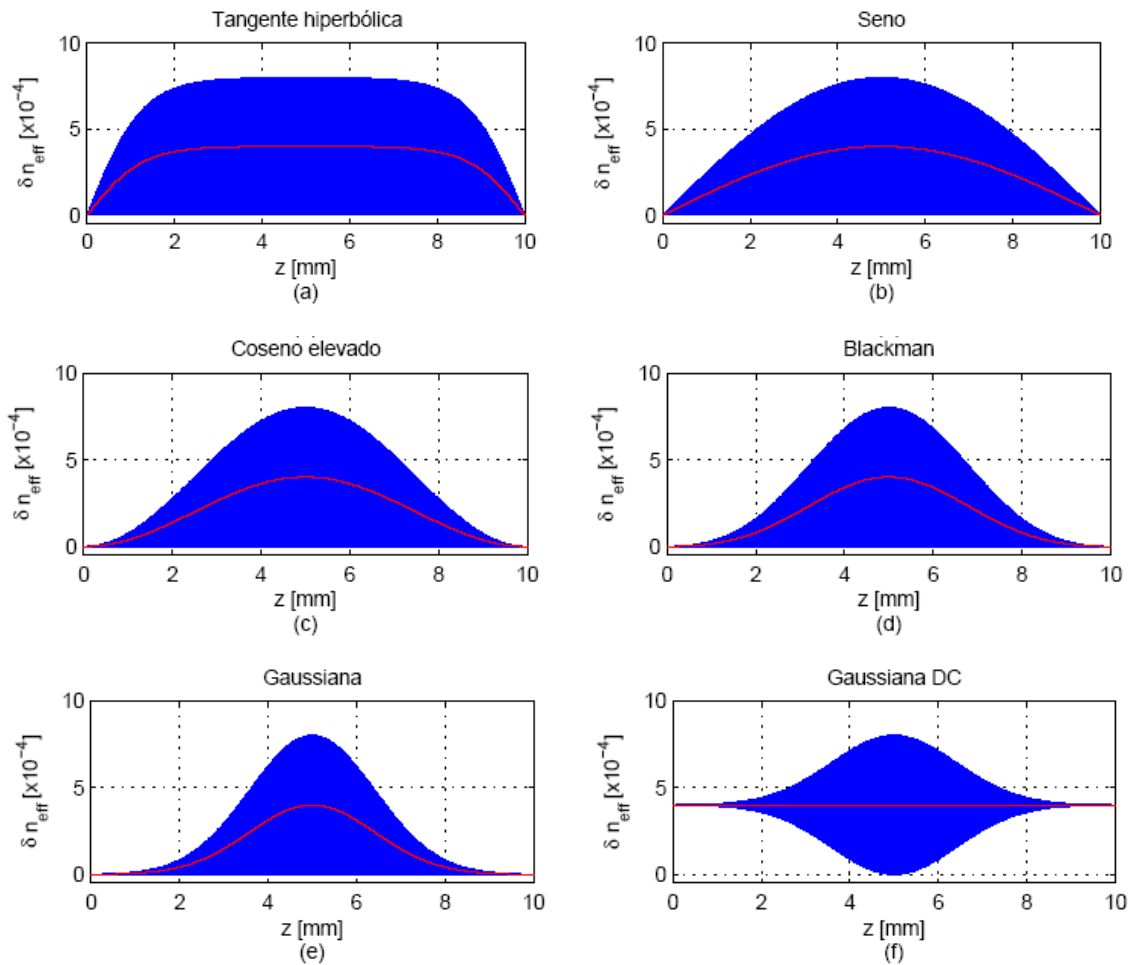


Figura 2.6. Perfis de apodização típicos. A linha a vermelho representa o valor médio da modulação. [2]

2.3.3. Redes de Bragg aperiódicas

As redes de Bragg aperiódicas são vulgarmente conhecidas como redes *chirped* (CFBG). Nestas redes há variação da condição de ressonância ao longo do seu comprimento, portanto são reflectidos diferentes comprimentos de em diferentes posições da rede. As redes *chirped* mais comuns são as redes período de modulação variável ao longo da sua extensão longitudinal. Olhando

para a expressão 2.7, o parâmetro responsável pelo controlo do tipo de aperiodicidade é o parâmetro $\phi(z)$.

A aperiodicidade em redes de Bragg implica alterações no atraso de grupo e na largura de banda. Neste tipo de redes verifica-se a ocorrência de ressonância para vários comprimentos de onda, o que se traduz numa rede com largura de banda muito superior às convencionais. Uma outra propriedade deste tipo de rede é o facto de diferentes comprimentos de onda serem reflectidos em diferentes posições da fibra, o que origina que o atraso de grupo seja dependente do comprimento de onda. No caso de termos uma aperiodicidade linear temos também um atraso de grupo linear, o que torna este tipo de redes interessantes para compensação de dispersão.

Pode-se expressar o período de uma rede aperiódica por um polinómio de grau N :

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z^2 + \Lambda_2 z^3 + \dots + \Lambda_N z^N \quad (2.13)$$

em que, Λ_0 representa o período à entrada da rede.

A condição de ressonância ao longo de uma rede Bragg pode também ser alterada pela variação, na equação 2.7, do índice de refração médio da rede ao longo do eixo z . No entanto é difícil obter redes deste género com alta qualidade.

Na figura 2.7 está representada esquematicamente a variação do período ao longo de uma rede Bragg.

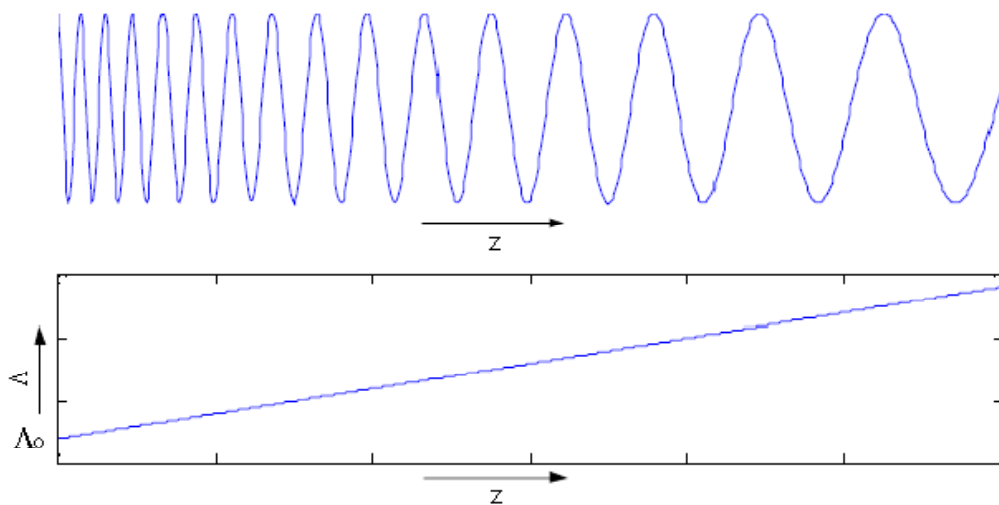


Figura 2.7. (cima) Variação do período refracção numa rede aperiódica linear. (baixo) variação do período respectivo. [1]

2.3.4. Redes de Bragg com deslocamento de fase

As redes de Bragg com deslocamento de fase são redes nas quais a distância entre os extremos interiores é inferior ao período de modulação. Em termos espectrais o deslocamento de fase na modulação do índice origina um filtro transmissivo na banda de rejeição da rede. Pode-se seleccionar o comprimento de onda do filtro através da posição na rede do salto de fase, do tipo de salto de fase, ou de ambos.

As redes de Bragg com deslocamento de fase têm muitas aplicações, nomeadamente como filtros transmissivos estreitos, interruptores ópticos ou na formatação de impulsos.

2.3.5. Redes de Bragg inclinadas

As redes de Bragg inclinadas são também conhecidas como redes *tilted* ou redes *blazed*, e consistem em redes de Bragg em que os planos de índice constantes fazem um ângulo θ_b com o eixo da fibra. Na figura 2.8 está representado o diagrama de uma rede de Bragg inclinada.

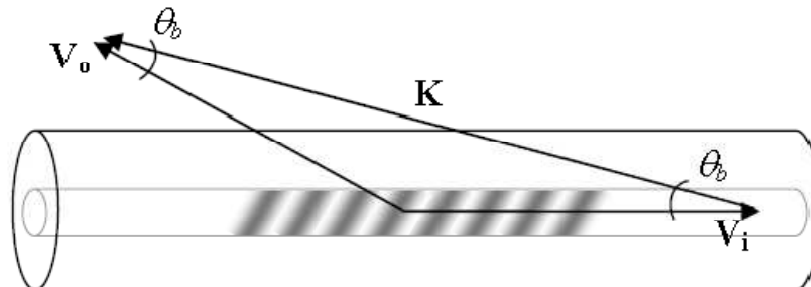


Figura 2.8. Diagrama vectorial da condição de Bragg para uma rede inclinada. [1]

As redes de Bragg inclinadas são usualmente utilizadas como acopladores modais ou como atenuadores selectivos no comprimento de onda.

2.4. Propriedades espectrais das redes bragg

Nesta secção são apresentadas algumas propriedades espectrais das redes de Bragg tais como reflectividade, fase e largura de banda. As propriedades espectrais estão relacionadas com as propriedades espaciais, portanto, irão ser descritas as propriedades espectrais de várias redes Bragg.

2.4.1. Redes uniformes

Antes de iniciar o estudo das propriedades espectrais das redes de Bragg uniformes têm que ser apresentadas as seguintes fórmulas para a reflectividade, R , e fase, ϕ_R :

$$R = |\rho|^2 = \frac{\sinh^2(\varphi L)}{\cosh^2(\varphi L) - \frac{\hat{\sigma}^2}{k^2}} \quad (2.14)$$

$$\phi_R = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\rho)}{\text{Re}(\rho)} \right] \quad (2.15)$$

As expressões 2.14 e 2.15 são obtidas recorrendo à teoria dos modos acoplados às redes Bragg [1].

É importante destacar, nas equações 2.14 e 2.15, alguns pormenores relativos ao factor φ . Quando $|k| > |\hat{\sigma}|$, φ pode tomar valores reais, quando $|k| < |\hat{\sigma}|$, φ pode tomar valores imaginários e quando $|k| = |\hat{\sigma}|$, φ pode ser nulo. Podem então verificar-se dois comportamentos diferentes da resposta da rede de Bragg uniforme. Quando φ é real a resposta da rede de Bragg é exponencial e quando φ é imaginário a resposta da rede de Bragg é oscilatória com saltos de fase. A fronteira entre estes dois comportamentos ocorre quando $\varphi = 0$, os comprimentos de onda para os quais se verifica esta situação podem ser calculados através da equação 2.16.

$$\lambda_{\text{fronteira}} = \lambda_{\text{Bragg}} \pm \Lambda \sqrt{\delta n_{\text{eff}}} \quad (2.16)$$

Na figura 2.9 está representada uma simulação da reflectividade e da fase de uma rede de Bragg uniforme em função do desvio do comprimento de onda em relação à ressonância. [1]

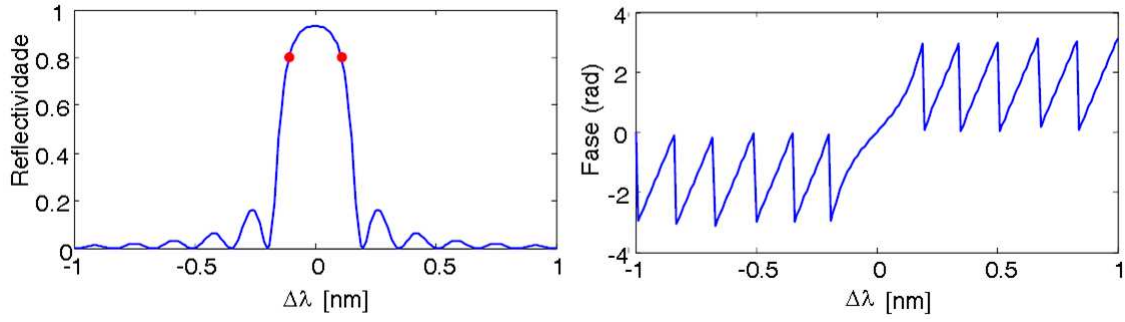


Figura 2.9. Reflectividade e fase de uma rede de Bragg uniforme em função do desvio ao comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda$). $L = 5\text{mm}$ e $\Delta n = 2 \times 10^{-4}$. [1]

Os círculos no gráfico da esquerda da figura 2.9, representam as fronteiras entre o comportamento exponencial e oscilatório da resposta da rede de Bragg uniforme, e foram calculados através da equação 2.16. Tanto no gráfico da direita como no da esquerda é bem visível a diferença entre o regime exponencial e regime oscilatório.

A largura de banda da rede pode ser aproximada à diferença de comprimentos de onda entre as fronteiras dos regimes oscilatório e exponencial, $\Delta\lambda_{\text{fronteira}}$. Assim da equação 2.16 resulta a equação 2.17:

$$\Delta\lambda_{\text{fronteira}} = 2\Lambda\sqrt{\delta n_{\text{eff}}} \quad (2.17)$$

Através da equação 2.17 pode então obter-se uma boa aproximação da largura de banda da rede de Bragg uniforme.

Uma outra forma de calcular a largura de banda de uma rede de Bragg uniforme, é através da separação dos zeros da rede no espectro de reflexão.

2.4.2. Redes apodizadas

Como foi referido na secção 2.3.2, a apodização é utilizada para reduzir os lóbulos laterais das redes de Bragg uniformes. O processo de redução dos lóbulos laterais pode ser mais facilmente entendido da seguinte forma. Sabe-se que a transformada de Fourier de uma função sinusoidal com janela rectangular, caso correspondente a uma rede uniforme que inicia e termina de forma abrupta, é a função sinc (seno cardinal). O que explica a existência dos lóbulos laterais do espectro de reflexão. Esses lóbulos laterais podem ser eliminados recorrendo a janelas com início e fim mais suave.

O processo mais simples de gravação de uma rede de Bragg apodizada consiste em controlar o tempo de exposição em cada secção da rede, sendo assim possível controlar a amplitude de modulação ao longo da rede. Esta técnica não compensa no entanto a variação do valor médio do índice de refração, originando assim uma cavidade de Fabry-Perot distribuída. A forma de evitar este efeito é manter constante ao longo da rede o valor médio do índice, sendo este processo designado por compensação DC.

Na figura 2.10 estão ilustradas as reflectividades de uma rede de Bragg uniforme com outras redes com apodizações diferentes mas com os mesmos parâmetros.

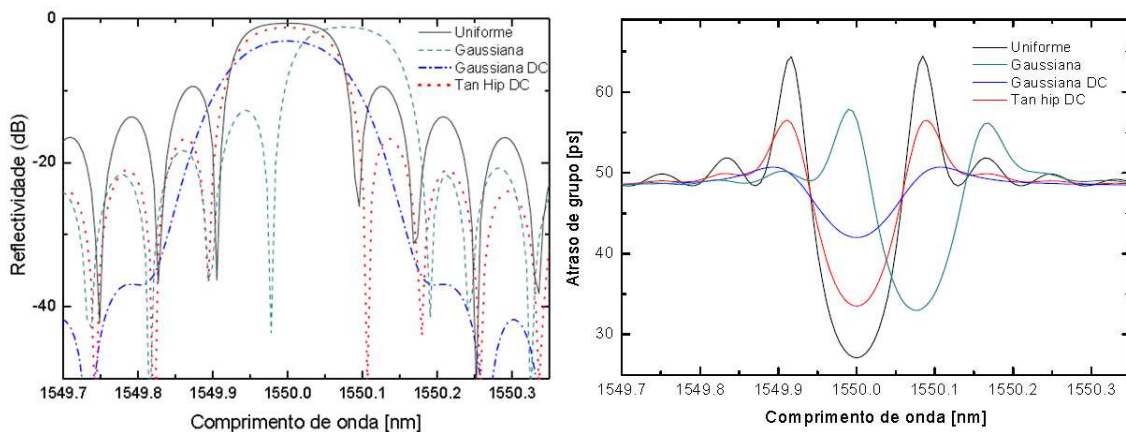


Figura 2.10. Reflectividade e atraso de grupo de uma rede de Bragg com vários perfis de apodização. Rede com $L = 10 \text{ mm}$, $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$. [1]

Como se pode ver na figura 2.10, as redes de Bragg apodizadas têm reflectividade máxima abaixo das redes de Bragg uniformes. A apodização gaussiana com compensação DC é a apodização que apresenta melhor supressão dos lóbulos. Relativamente ao atraso de grupo, este também sofre alterações em função da apodização, como seria de esperar. Os picos do atraso de grupo correspondem com os nulos do espectro de reflexão e aparecem devido ao efeito de cavidade de Fabry Perot das extremidades da rede. Os nulos no espectro de reflexão correspondem a ressonâncias da cavidade, o que origina múltiplas reflexões dentro da rede, resultando assim num maior atraso de grupo.

O controlo dos lóbulos laterais altera outros parâmetros da rede, tais como dispersão e largura de banda. Este facto obriga a alguns cuidados aquando o desenho do perfil de apodização de uma rede Bragg.

2.4.2.1. Redes Sinc

Uma rede Sinc é uma rede com perfil de visibilidade seno cardinal. Este perfil tem a seguinte expressão:

$$v(z) = \left| \text{sinc} \left(\frac{z - \frac{l}{2}}{T} \right) \right| \quad (2.18)$$

Na figura 2.11 está apresentada a perturbação do índice de refração considerando apodização do tipo sinc.

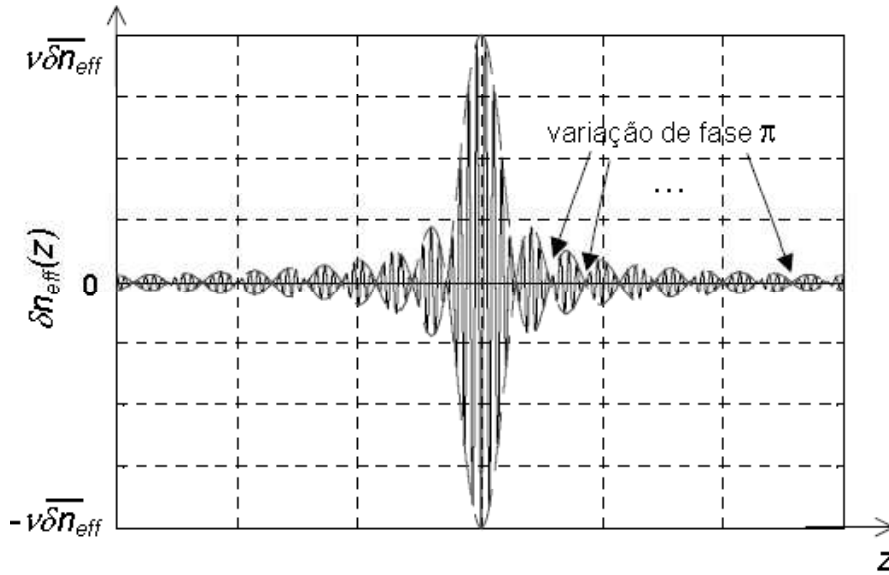


Figura 2.11. Perturbação do índice de refração considerando apodização sinc. (linhas a tracejado) envolvente. (linha a cheio) valor médio. [8]

Apenas pode ser gravado um número limitado de lóbulos. Obtendo-se assim uma sinc truncada. Pode-se controlar a largura de banda do filtro através do comprimento da rede e do número de zeros da função sinc. Maior largura de banda, corresponde a um menor período, resultando num tamanho de rede menor.

Uma apodização com perfil sinc pode ser utilizada para obtenção de filtro com um perfil muito próximo do rectangular. A transformada de Fourier da função sinc resulta numa função com perfil rectangular. Na figura 2.12 está representada a reflectividade e atraso de grupo de uma rede de Bragg com perfil de apodização sinc.

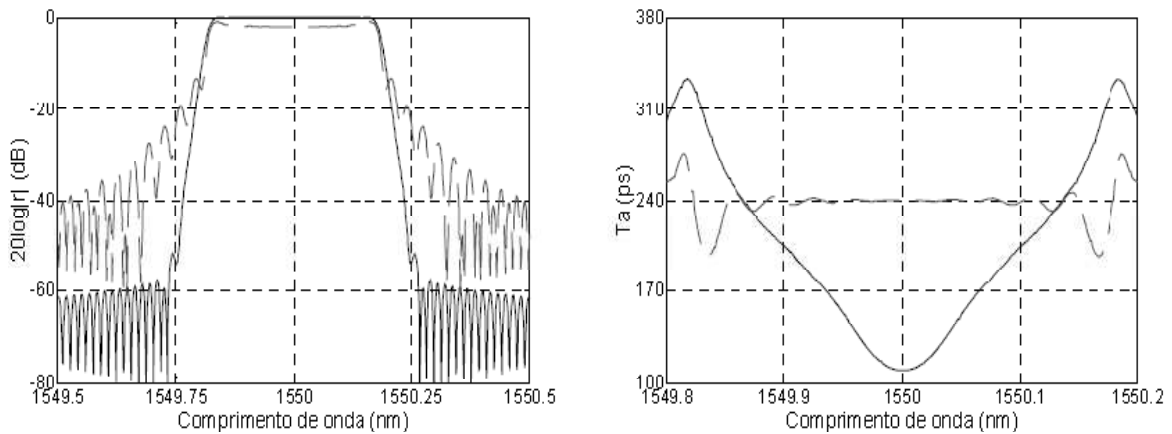


Figura 2.12. (esquerda) espectros de reflexão e (direita) atraso de grupo de FBGs com diferentes apodizações, (tracejado) sinc. (a cheio) gaussiana DC. [8]

A vantagem das redes de Bragg com perfil de apodização sinc, é o facto de o atraso de grupo permanecer constante na banda de passagem, figura 2.12 (direita), e boa rejeição fora da banda (figura 2.12 (esquerda)), apesar de inferior a outras apodizações (por exemplo a gaussiana DC apresentada na figura 2.12), tornando-a adequada para operações de filtragem em sistemas WDM.

Aumentando o número de lóbulos secundários de cada lado do lóbulo principal e mantendo o comprimento, o perfil representado na figura 2.11 apresenta 9 lóbulos de cada lado, aumenta-se a linearidade da fase da resposta, mas também as perdas por inserção.

2.5. Simulação de redes de Bragg

As redes de Bragg uniformes têm uma solução analítica que pode ser utilizada para calcular a sua resposta espectral. No entanto, e como já foi dito anteriormente, a grande parte das redes de Bragg utilizadas em aplicações práticas não são redes uniformes. E para redes não uniformes não existe uma forma simples de obter uma solução analítica, portanto é necessário utilizar técnicas para determinar as características de uma rede de Bragg não uniforme.

Existem vários métodos para determinar as características de uma rede de Bragg não uniforme. O método utilizado neste trabalho, um dos métodos mais populares, é o método da matriz de transferência. Esta técnica permite para

além de solucionar o problema do acoplamento entre modos numa rede de forma elegante e directa, permite também obter resultados precisos de uma forma rápida.

2.5.1. Método da matriz de transferência

O método da matriz de transferência representa uma forma elegante e rápida de determinar a função de transferência de uma rede não uniforme. A aplicação deste método baseia-se na divisão da rede de Bragg não uniforme em secções longitudinais pequenas o suficiente para que cada secção possa ser considerada uma rede de Bragg uniforme. Tornando-se assim possível determinar a função de transferência individual de cada uma dessas secções. A função de transferência da rede total é determinada recorrendo ao método matricial para calcular o produto de todas as funções de transferência individuais.

Na figura 2.13, está ilustrada uma secção k com comprimento L_k de uma rede de Bragg não uniforme dividida em M secções consideradas uniformes.

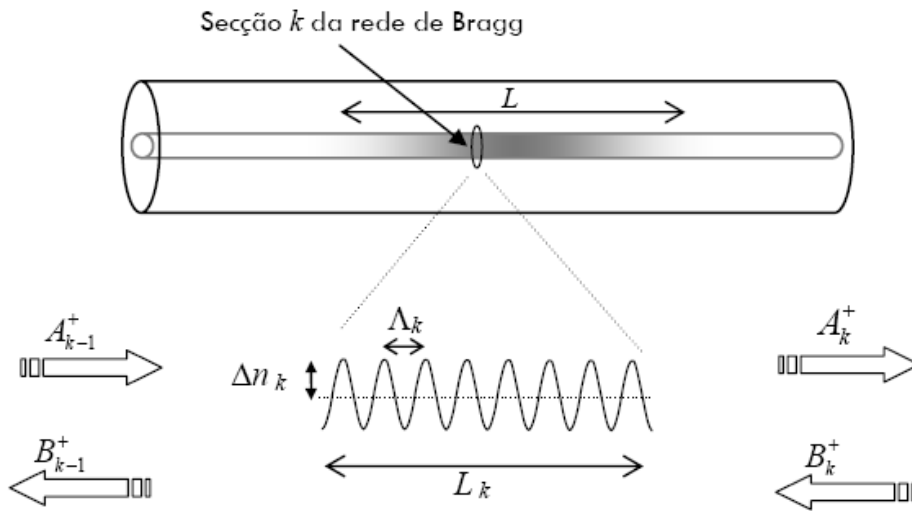


Figura 2.13 Secção de uma rede de Bragg utilizada no método de matriz de transferência. [1]

Cada uma das M secções pode ser considerada como um dispositivo de quatro portas com duas entradas e duas saídas. As duas entradas são A_{k-1}^+ e B_{k-1}^+ , e as duas saídas B_k^+ e A_k^+ . A propagação dos campos de uma secção uniforme k

para uma secção contigua pode ser definida através da teoria matricial da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} A_{k-1}^+ \\ B_{k-1}^+ \end{bmatrix} = T_k \begin{bmatrix} A_k^+ \\ B_k^+ \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

onde T_k representa a função de transferência da rede que corresponde à secção k . A equação anterior pode ser rescrita, considerando que não há absorções nem ganho, em função das condições fronteira:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ B_{k-1}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_k^+ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Os elementos da matriz T_k , calculados através das soluções da teoria dos modos acoplados para uma rede uniforme [1], são:

$$\begin{aligned} T_{11} &= \cosh(\varphi L_k) - i \frac{\hat{\sigma}}{\varphi} \sinh(\varphi L_k) \\ T_{12} &= -i \frac{\kappa}{\varphi} \sinh(\varphi L_k) \\ T_{21} &= T_{12}^* \\ T_{22} &= T_{11}^* \end{aligned} \quad (2.21)$$

Sendo que os coeficientes φ , κ e $\hat{\sigma}$, representam parâmetros locais da rede uniforme de comprimento L_k , ver [1] e [3]. Depois de conhecidas as funções de transferência de todas as M secções, a função de transferência total da rede é calculada a partir da multiplicação individual das matrizes T_k :

$$T = \prod_{k=1}^M T_k \quad (2.22)$$

Utilizando as condições fronteira definidas, podem ser calculados os coeficientes de reflexão, R , e de transmissão, T^r :

$$R = \left| \frac{T_{21}}{T_{11}} \right|^2 \quad (2.23)$$

$$T^r = \left| \frac{1}{T_{11}} \right|^2 \quad (2.24)$$

As equações apresentadas nesta secção permitem simular, pelo método matricial, redes de Bragg qualquer que seja a sua apodização e aperiodicidade.

No caso de se pretender simular redes de Bragg com saltos de fase, utiliza-se uma F dada por:

$$F = \begin{bmatrix} e^{-\frac{i\phi_f}{2}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\phi_f}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

onde ϕ_f representa o salto de fase correspondente. A matriz F é utilizada entre as duas secções onde ocorre o salto de fase.

Condições de utilização do método da matriz de transferência.

Para simular redes de Bragg não uniformes recorrendo ao método da matriz de transferência, é necessário considerar as seguintes condições:

- i. As secções têm que ser pequenas o suficiente para que a aproximação a uma rede uniforme seja válida. A aproximação a uma rede uniforme exige no entanto que: $L_k \gg \Lambda$, portanto as dimensões de cada secção não podem ser demasiado pequenas.
- ii. O comprimento de cada secção k deverá ser: $L_k = N_k \Lambda$, onde N_k representa um numero natural. Esta condição é importante na medida em que permite transições suaves entre secções contíguas, isto é, sem saltos de fase.

- iii. Tem que haver cuidado no dimensionamento das secções para que as variações de k entre cada secção sejam suaves. Esta condição é importante na medida em que caso essas variações não sejam suaves poderá ocorrer o efeito de superestrutura, originando réplicas do pico de reflexão em outros comprimentos de onda.

CAPÍTULO 3 – GRAVAÇÃO DE REDES BRAGG

3.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas técnicas de gravação de redes Bragg em fibra óptica. Na secção 3.2 são apresentadas as principais técnicas de gravação de redes de Bragg, abordadas nesta dissertação, a gravação por máscara de fase e a gravação por interferómetro. Na secção 3.3 é apresentado o sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro.

3.2. Técnicas de gravação

A técnica mais usual de gravação de redes Bragg, consiste em expor uma fibra fotossensibilizada a um padrão de franjas de interferência na região do ultravioleta. É possível obter esse padrão através de dois métodos, máscara de fase ou interferómetro. Com estes dois métodos é possível gravar diferentes tipos de redes.

Utilizando o interferómetro é possível gravar redes com diferentes comprimentos de onda ajustando os ângulos de interferência. No caso da máscara de fase o mesmo é possível aplicando uma tensão longitudinal na fibra, durante a gravação. É também possível gravar redes com um comprimento superior ao diâmetro do feixe. Para tal tem que se fazer um varrimento ao longo da fibra, ou no caso de redes ainda mais longas, gravar redes adjacentes em saltos de fase. Gravar redes com salto de fase é possível ajustando a polarização do laser. Esta técnica de alteração da polarização do laser permite também gravar redes apodizadas complexas. Para gravar redes apodizadas existem outras técnicas, tais como ajustar o tempo de exposição em cada ponto da rede, para o caso do varrimento do laser, ou por dupla exposição. Uma das técnicas mais versáteis para gravar redes de Bragg

apodizadas consiste na alteração da visibilidade das franjas através do ajuste dinâmico da incidência do laser numa máscara de fase. É possível alterar a visibilidade das franjas de interferência se se alterar a frequência e amplitude de variação do ângulo de incidência, por consequência é possível alterar a apodização.

3.2.1. Gravação por máscara de fase

A gravação por máscara de fase é um dos processos mais práticos e eficazes para gravação de redes de Bragg em fibra óptica. A máscara de fase é um módulo de difracção óptica utilizado na transmissão, e consiste numa sequência de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica.

O princípio de funcionamento desta técnica é baseado na sobreposição de duas ordens de difracção no núcleo da fibra que está na zona de sobreposição. Sendo assim possível formar um padrão de interferência.

As máscaras de fase normalmente são desenhadas para que no caso de uma incidência normal, as ordens de difracção +1 e -1 sejam maximizadas enquanto a ordem 0 é minimizada. A figura 3.1 ilustra isso mesmo.

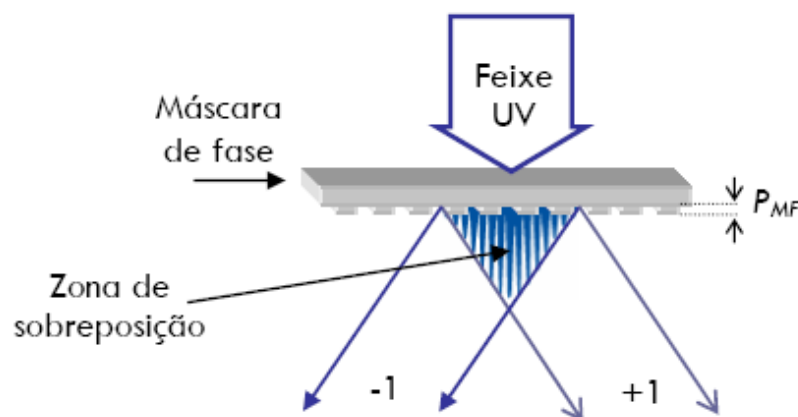


Figura 3.1. Representação esquemática da difracção das ordens -1 e +1 na máscara de fase. [1]

Na figura 3.2 está ilustrada a gravação com máscara de fase com uma incidência não normal. Este tipo de incidência é utilizado para gravar redes de Bragg com ordens 0 e -1. Estas máscaras de fase, com as ordens -1 e 0 maximizadas, são utilizadas em situações onde é necessária a eliminação completa de ordens superiores. Técnica geralmente utilizada na óptica integrada ou no fabrico de lasers semicondutores monomodo, para

praticamente todas as outras aplicações é preferível a incidência normal, uma vez que o alinhamento é mais fácil.

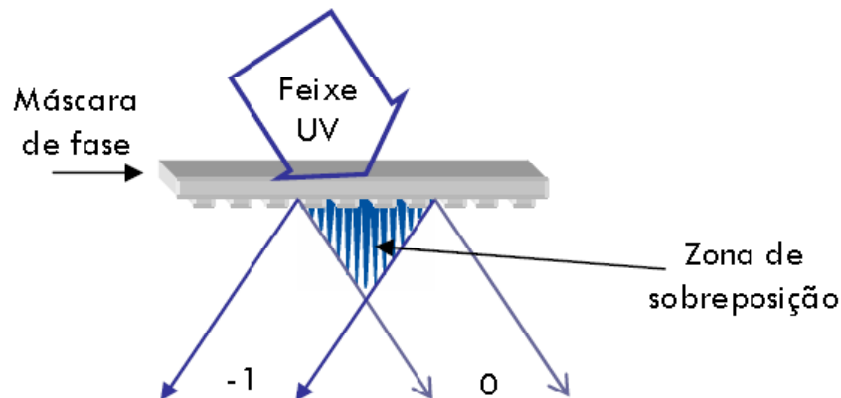


Figura 3.2. Representação esquemática da difração das ordens -1 e 0 na máscara de fase. [1]

A fibra deve ser posicionada logo a seguir à máscara de fase, para que a parte do núcleo onde se deseja efectuar a gravação esteja na zona assinalada como a zona de sobreposição. Na zona de sobreposição são originadas franjas de interferência com um período $\Lambda = \Lambda_{MF}/2$, sendo que Λ_{MF} representa o período das depressões da máscara de fase. Essas franjas de interferência irão formar as redes de Bragg. Se a intensidade do laser for muito elevada, no caso de uma incidência normal, figura 3.1, poderá ocorrer interferência da ordem zero e o período das franjas será igual ao da máscara de fase. É também importante ter em atenção a coerência espacial do laser pois este deve ser superior à distância entre a máscara de fase e o núcleo da fibra. Já a coerência temporal não é tão importante nesta técnica, pois o percurso óptico das duas ordens é igual.

É desaconselhável que a fibra esteja em contacto com a máscara de fase, pois esse contacto pode danificar a máscara.

3.2.2. Gravação por interferómetro

Dentro da técnica de gravação por interferómetro há duas variantes, interferómetro por divisão de amplitude e interferómetro com máscara de fase. São estas duas variantes que vão ser apresentadas nesta secção.

3.2.2.1. Interferómetro por divisão de amplitude

As redes Bragg em fibra óptica podem ser gravadas por exposição transversal. Para tal é utilizado um interferómetro por divisão de amplitude, utilizado vulgarmente em técnicas holográficas. Na figura 3.3 está representado um interferómetro por divisão de amplitude.

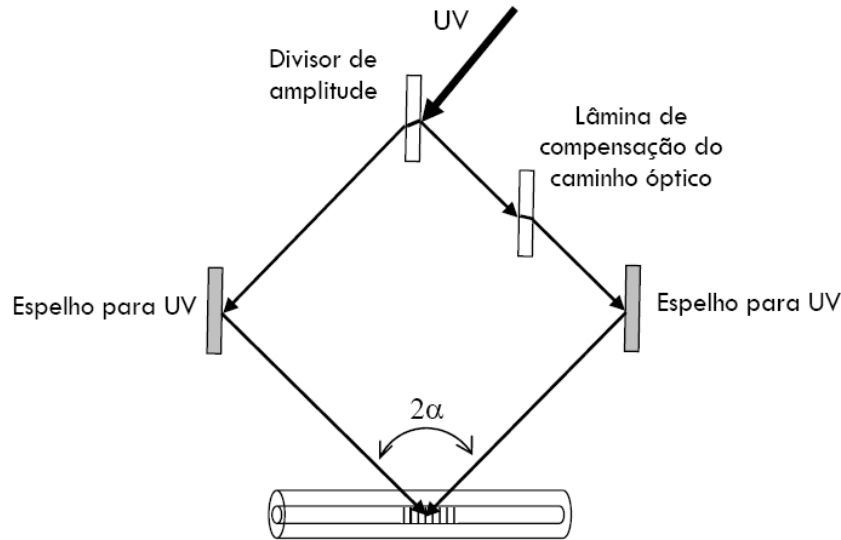


Figura 3.3. Interferómetro por divisão de amplitude para gravação de redes Bragg. [1]

Como pode ser observado na figura 3.3, o feixe ultra violeta é dividido em dois por um divisor de amplitude, sendo que os feixes apresentam amplitudes idênticas. Depois de divididos, os dois feixes são reflectidos por dois espelhos próprios para emissão ultravioleta, recombina-se no núcleo da fibra. Os feixes recombina-se no núcleo da fibra com um ângulo 2α entre eles, criando assim um padrão de interferência. O período das franjas de interferência, Λ , é dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2n_{eff} \sin \alpha} \quad (3.1)$$

Comparando este método com o método da máscara de fase, facilmente se conclui que este é muito mais versátil, pois permite gravar redes com comprimento de onda de Bragg entre valores próximos de λ_{UV} até ao infinito ($\alpha = 0$). São necessários no entanto cuidados especiais no que diz respeito ao dispositivo de gravação, pois este terá que ser imune a factores externos como vibrações e turbulências do ar. Caso o laser tenha baixa coerência temporal

torna-se necessário corrigir a diferença de caminhos ópticos que o divisor de amplitude induz. Para tal utiliza-se uma lâmina de compensação do caminho óptico.

3.2.2.2. Interferómetro com máscara de fase

Neste método é feita a divisão de amplitude do feixe ultravioleta com recurso a uma máscara de fase, ao contrário do método anterior em que se utilizava um divisor de amplitude.

Na figura 3.4 é apresentado um esquema de gravação baseado no método de interferómetro com máscara de fase.

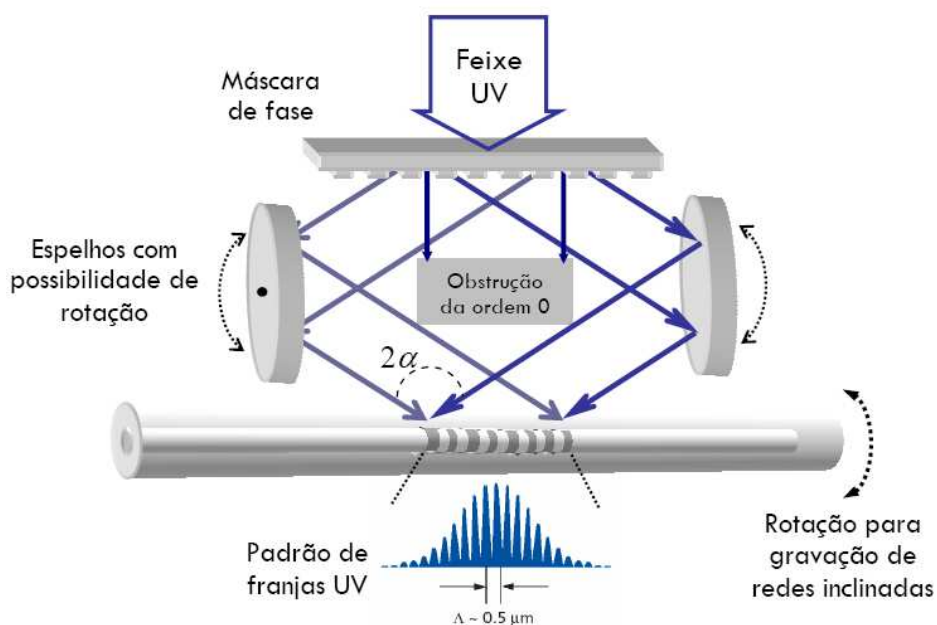


Figura 3.4. Método de gravação de redes Bragg baseado no método interferómetro com máscara de fase. [1]

Neste método apenas são aproveitadas as ordens +1 e -1, sendo as restantes excluídas. Os feixes das ordens +1 e -1 são direccionados para a fibra fotossensibilizada depois de reflectidos pelos espelhos próprios para a emissão ultravioleta. A utilização das ordens -1e 0 é também uma possibilidade embora não seja tão prático. Para gravar redes de Bragg inclinadas, utilizando este método, basta rodar uma das extremidades da fibra em relação à outra.

Embora mais dispendioso, este método apresenta algumas vantagens quando comparado com o método do divisor de amplitude comum. Tais como, a incidência na máscara de fase ser normal a esta, o que simplifica o

alinhamento e o facto de a utilização da máscara de fase como divisor de amplitude permitir que esta seja usada como referência para o comprimento de onda.

Com o método de interferómetro com máscara de fase é possível obter sintonias elevadas.

No caso de se utilizar uma máscara de fase, o período das franjas de interferência, Λ , é dado por:

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{MF}}{2} \quad (3.2)$$

3.2.3. Gravação de redes longas

Utilizando os métodos descritos anteriormente, o comprimento das redes de Bragg gravadas é sensivelmente igual ao diâmetro do feixe ultravioleta. Como é difícil desenvolver lasers com diâmetro elevado, devido a problemas de estabilidade, o comprimento das redes que se conseguem gravar através dos outros métodos não é superior a 1 cm. O que se apresenta como uma importante limitação.

A solução encontrada para contornar essa limitação passa por utilizar uma técnica de gravação chamada de varrimento. Esta técnica de varrimento pode ser utilizada tanto na gravação por máscara de fase como na gravação por interferómetro, e basicamente consiste em fazer um varrimento com o laser no plano de gravação. Como facilmente se percebe, no caso de todo o sistema ser estático, com excepção para o laser, o efeito é o mesmo que efectuar a gravação com um laser de diâmetro igual ao da amplitude de varrimento. Utilizando esta técnica o comprimento das redes fica então limitado pela amplitude de varrimento, pela largura dos espelhos e pelo comprimento da máscara de fase, se utilizada.

As limitações descritas anteriormente são importantes caso se queira gravar redes muito longas, como é o caso das redes compensadoras de dispersão. Uma das soluções para contornar essas limitações e assim ser possível gravar redes muito longas, consiste em fazer gravações sequenciais de conjuntos de redes adjacentes na fibra. Para se conseguir isso, o posicionador da fibra terá que ter uma elevada precisão para que não surjam saltos de fase entre as redes adjacentes. No caso de se pretender efectuar a gravação utilizando uma máscara de fase fixa, só se conseguem gravar redes com comprimento de onda igual ao comprimento de onda da máscara de fase. Uma solução para

contornar esse problema passa por utilizar um interferómetro para manipular o comprimento de onda de um conjunto de redes. Uma outra solução passa por utilizar uma máscara de fase movida a uma velocidade V_{MF} , enquanto a fibra é movida a uma velocidade V_F . Assim torna-se possível gravar várias aperiodicidades ao longo da fibra, apenas controlando a velocidade da fibra e da máscara de fase. A diferença entre o comprimento de onda gravado e o comprimento de onda original é dado por:

$$\Delta\lambda = \Lambda_{\text{Bragg}} \frac{V_F}{V_{MF}} \quad (3.3)$$

onde, Λ_{Bragg} corresponde ao período da rede gravada caso se tratasse de uma situação estática.

3.3. Sistema de gravação implementado

Devido à necessidade de desenvolver um sistema de gravação muito flexível capaz de gravar diferentes redes de Bragg de grande qualidade e também estruturas complexas, implementou-se um método baseado no interferómetro com máscara de fase. Sendo que se deixou também em aberto a possibilidade de gravar redes directamente com máscara de fase. Tanto para um caso como para outro é possível utilizar o varrimento do feixe.

Na figura 3.5 está representado de uma forma simplificada o sistema de gravação de redes de Bragg implementado no *Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro*.

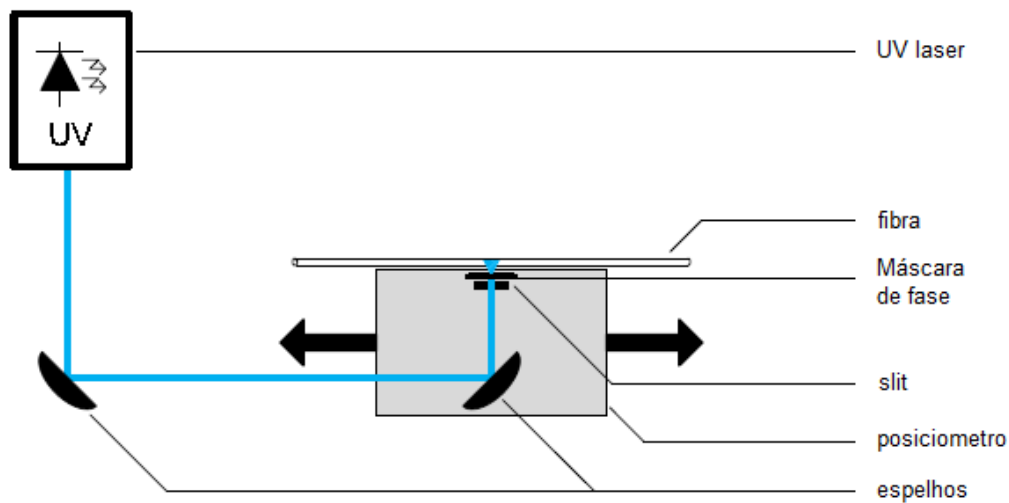


Figura 3.5. Sistema de gravação de redes de Bragg implementado. [5]

O funcionamento do sistema implementado pode ser descrito sucintamente como, o laser emite com um comprimento de onda na ordem dos 248nm. A fibra na qual se pretende gravar a rede fica imóvel enquanto o posicionador se pode mover longitudinalmente ao longo da fibra. No posicionador está incluído um espelho, *slit* e a máscara de fase. A variação do índice de refração da fibra depende do tempo de exposição. O *slit* define o tamanho do *step* a ser gravado, quanto menor o *step* maior a precisão, à custa de uma gravação mais lenta.

A gravação de redes de Bragg com um comprimento superior ao comprimento da máscara de fase é possível devido ao posicionador móvel. O posicionador tem uma precisão de menos de 1nm. Depois da primeira exposição, o posicionador move-se e dá-se a segunda exposição. E isto acontece sucessivamente até atingir o comprimento final da rede de Bragg. A apodização pode ser controlada variando o tempo de cada exposição. No fim de todo o processo iremos ter uma rede de Bragg composta por várias secções, uma secção por cada exposição, adjacentes. O sistema implementado é baseado no método de *stitching*.

3.4. Método de *Stitching*

O sistema de gravação implementado permite controlar a variação do índice de refração, através do tempo de exposição. Este método tem a vantagem de não apresentar problemas de transição de fase. No entanto uma variação da visibilidade implica uma variação da apodização. Este método, designado por *filling method*, está ilustrado na figura 3.6.

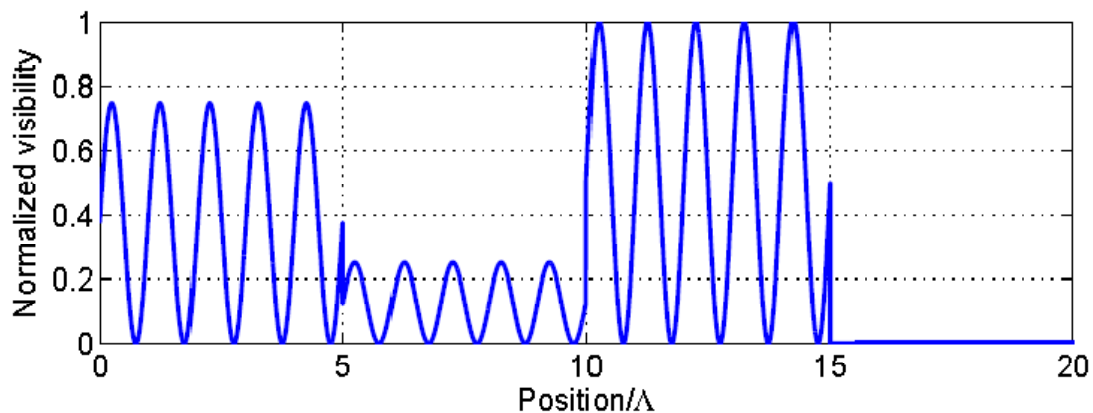


Figura 3.6. Quatro secções de um FBG gravadas de acordo com o método de *filling*. Cada exposição com um comprimento de 5 períodos .[5]

O método apresentado anteriormente, *filling*, é um método muito simples em que a variação da visibilidade implica uma variação da apodização. Isto representa uma séria limitação quando se desenham filtros ópticos, pois a variação do valor médio do índice de refração resulta em distorção da resposta espectral. Na figura 3.7 está representada essa distorção.

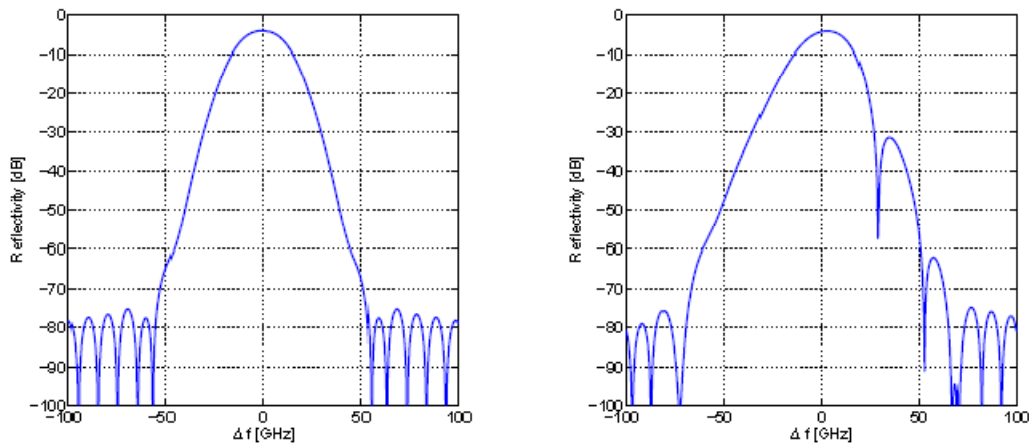


Figura 3.7. Reflectividade de duas FBGs. (esquerda) apodização constante e visibilidade gaussiana. (direita) apodização e visibilidade Gaussianas. [5]

Quando se torna necessário uma variação da visibilidade independente do perfil da apodização, tem que se utilizar um outro método de gravação de FBGs. Uma solução possível é fazer duas exposições idênticas por secção em vez de uma, onde a segunda exposição está ligeiramente desfasada da primeira, método de *stitching*.

Na figura 3.8 está representada a sobreposição de duas FBGs gravadas com o mesmo período de modulação.

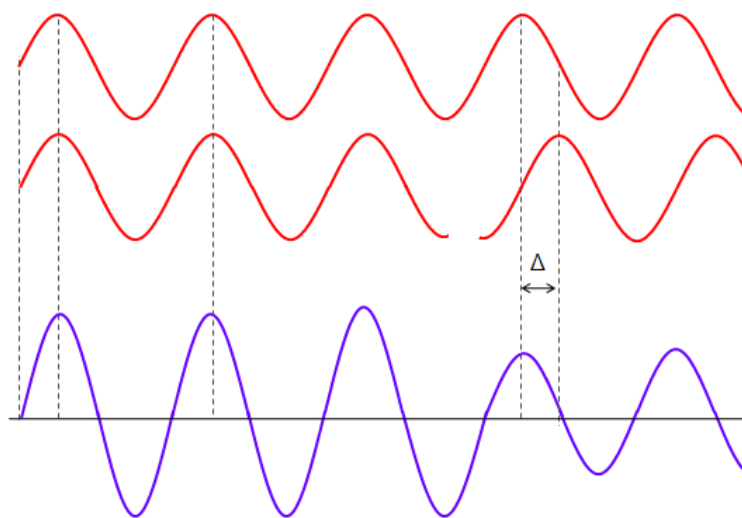


Figura 3.8. Representação da sobreposição de duas FBGs com o mesmo período de modulação.[2]

As sinusóides vermelhas representam a visibilidade de duas FBGs gravadas isoladamente. A roxo aparece a visibilidade da FBG resultante da sobreposição das duas vermelhas.

Se as duas FBGs forem gravadas em sobreposição, a amplitude de modulação da FBG resultante irá depender da fase relativa entre as duas gravações.

Como se pode observar na figura 3.8, quando as FBGs a vermelho estão em fase, a FBG a roxo apresenta o dobro da amplitude de cada uma das FBGs a vermelho. No entanto em termos de visibilidade continua a variar entre 0 e 1. Na figura 3.8 é ainda possível observar que se as ondas a vermelho estiverem ligeiramente desfasadas (Δ), a amplitude resultante da sobreposição já não irá ser igual ao dobro da amplitude de cada uma das vermelhas.

É fácil de perceber que com este método é possível reduzir a visibilidade a zero, bastando para isso alterar o valor do desfasamento entre as duas redes a sobrepor. Na figura 3.9 está representada a variação da visibilidade da FBG resultante em função do desfasamento.

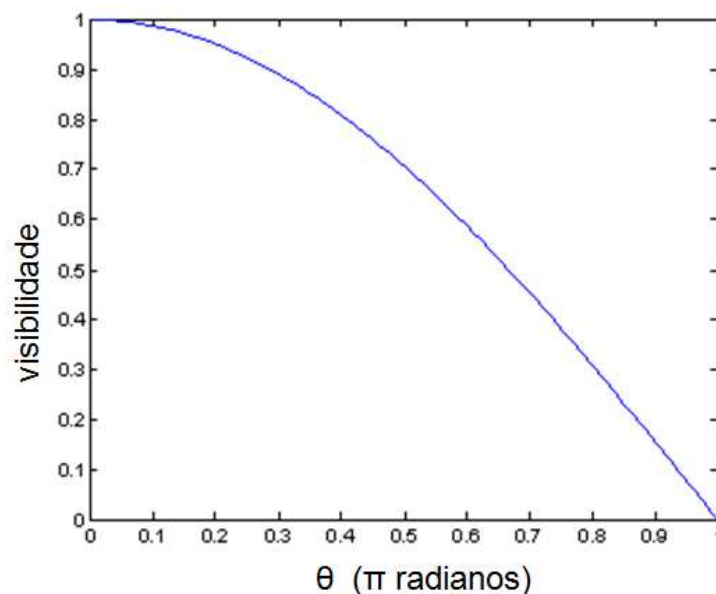


Figura 3.9. Visibilidade em função do desfasamento. [2]

Como se pode ver na figura 3.9, a visibilidade da onda resultante é máxima quando o desfasamento entre as duas ondas é zero, ou seja, estão em fase. E a visibilidade é mínima quando o desfasamento entre as duas ondas é de π radianos, ou seja, estão em oposição de fase.

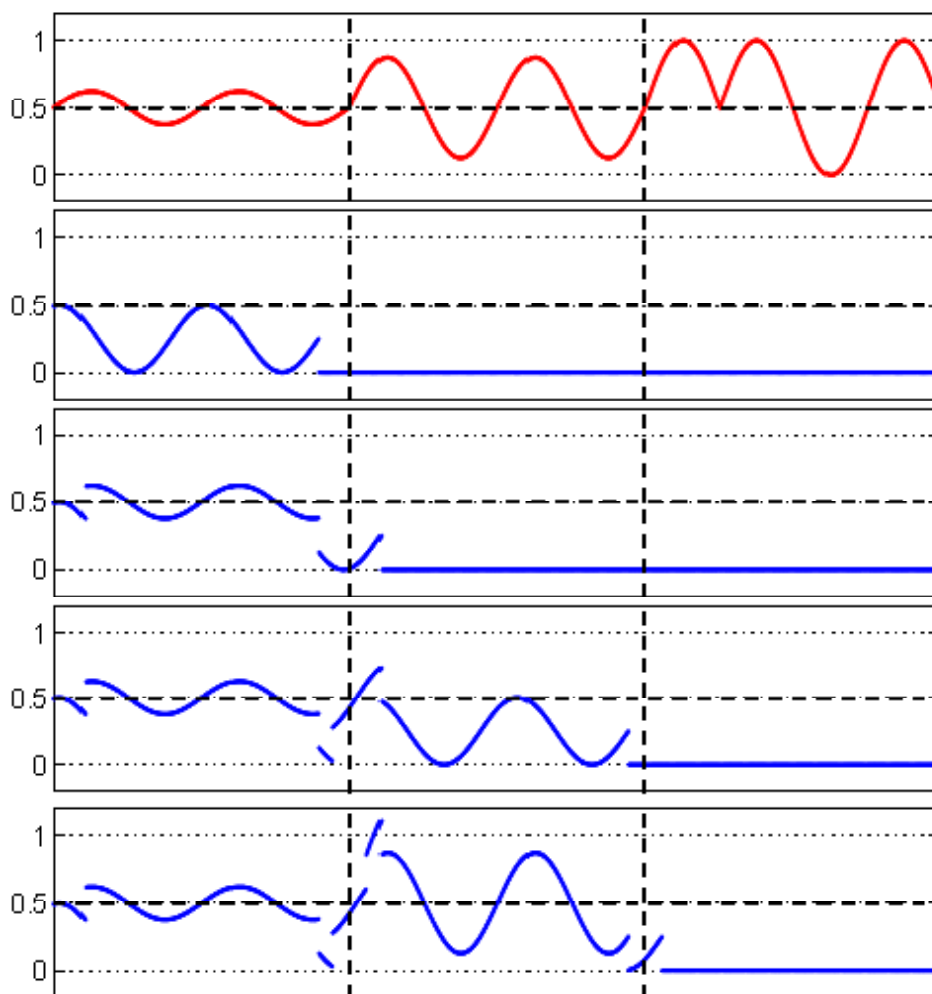
Para se poder fazer a gravação utilizando este método, é necessário traduzir o desfasamento para que seja correctamente interpretado pelo sistema de gravação. É portanto necessário obter uma relação entre o desfasamento em

radianos e o desfasamento em *steps*. Considerando θ o desfasamento em radianos e $\Delta z(v)$ o desfasamento em *steps*. A relação é a seguinte:

$$\theta = \frac{\Delta z(v)}{\Lambda} \times 2\pi \quad (3.4)$$

Na equação 3.4, Λ representa o período da rede.

Na figura 3.10 está representado um exemplo de uma FBG implementada utilizando o método de *stitching*. Cada exposição com comprimento 2Λ . A FBG é composta por três secções com visibilidade de 0.25, 0.75 e 1, respectivamente. [5]



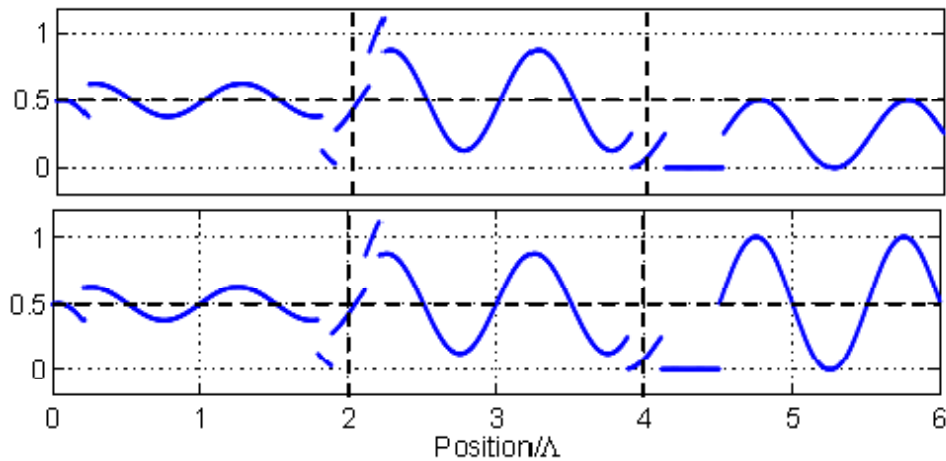


Figura 3.10. Exemplo do método de *stitching*. (cima) FBG ideal. (segunda até última) primeira de seis exposições. O eixo vertical representa a visibilidade normalizada.[5]

Na figura 3.10, a primeira imagem, a vermelho, representa a FBG que se pretende implementar com o método de *stitching*, as imagens seguintes representam cada uma das exposições. A última figura da imagem 3.10 representa a FBG obtida com o método de *stitching*, que como se pode observar apresenta algumas diferenças da ideal.

Como se pode observar na figura 3.10, a primeira exposição de cada secção não se encontra em fase com a FBG ideal, a segunda exposição corrige a fase, ficando assim em fase com a FBG ideal.

CAPÍTULO 4 – IMPLEMENTAÇÃO DE FBGs

4.1. Introdução

Este capítulo encontra-se dividido em cinco secções, sendo que a primeira, 4.1, corresponde a esta introdução.

Na secção 4.2. é apresentado o algoritmo desenvolvido para a implementação de FBGs (apêndice C). Começando por se explicar o algoritmo desenvolvido para fazer a importação da função de transferência de um filtro ou o design deste. De seguida é apresentado o algoritmo de *layer pelling* [6], que é o algoritmo responsável por obter a variação do índice de refração da rede Bragg através da função de transferência do filtro e é também apresentado um algoritmo de rectificação [7]. Finalmente é apresentado o algoritmo que permite calcular a sequência de *steps*, necessários ao sistema de gravação, através da curva de visibilidade. Nesta secção é ainda explicada a forma como todos os blocos estão interligados e cooperam uns com os outros.

Na secção 4.3. é apresentada a forma como foram feitas as simulações da resposta espectral das redes Bragg. Sendo também apresentadas algumas simulações.

Na secção 4.4. são apresentados desenhos de filtros, e a forma como são feitos no *software* desenvolvido, e a gravação desses mesmos filtros. São ainda apresentadas respostas simuladas e respostas das redes gravadas.

Na secção 4.5. são apresentadas caracterizações das redes de Bragg desenhadas.

4.2. Algoritmo para implementação de FBGs

Para a implementação de FBGs foi desenvolvido um *software* (Apêndice C) capaz de fazer todo o processamento necessário desde o desenho do filtro pretendido, até à geração do ficheiro de *steps* necessário ao sistema de gravação existente no *Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro*. Nesta secção irá ser apresentado de uma forma sucinta esse mesmo algoritmo.

4.2.1. Import / Design do filtro

O *software* desenvolvido permite fazer a importação da função de transferência de um filtro ou fazer o desenho da mesma, sendo que para a segunda opção a função de transferência é calculada pelo software.

No caso de a opção recair sobre fazer a importação da função de transferência de um filtro, a entrada terá que ser um ficheiro de texto com o seguinte formato:

:	:	:
:	:	:
2. 5303148707175385e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338023046761691e+014
3. 0005480276763606e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338073059264816e+014
3. 5319020492186194e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338123071767941e+014
4. 1275601326381237e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338173084271069e+014
4. 7901386244082897e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338223096774194e+014
5. 5215941411202431e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338273109277319e+014
6. 3231430362549801e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338323121780444e+014
7. 1951962482577694e-002	0. 0000000000000000e+000	1. 9338373134283572e+014
:	:	:
:	:	:
:	:	:

Figura 4.1. Formato do ficheiro de texto necessário para fazer a importação da função de transferência de um filtro

Na figura 4.1, a primeira coluna corresponde à parte real da reflectividade do filtro, a segunda coluna corresponde à parte imaginária da reflectividade do filtro e a terceira coluna corresponde à frequência.

No caso de a opção recair sobre fazer o desenho do filtro, têm que se definir os parâmetros presentes na figura 4.2.

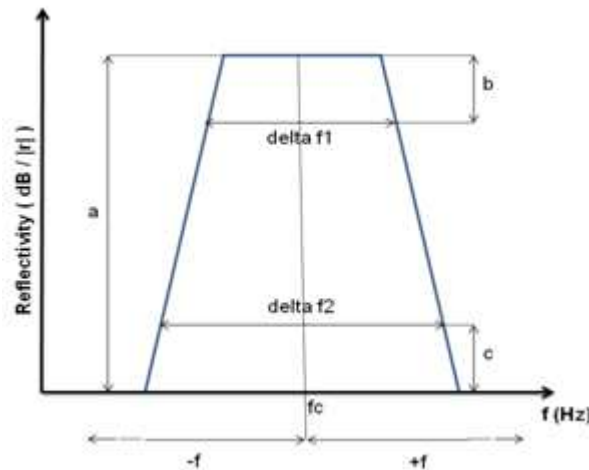


Figura 4.2. Formato do filtro que pode ser desenhado no software desenvolvido.

Os parâmetros a, b e c podem ser definidos em dB ($-\infty < a < 0$) ou em módulo da reflectividade ($0 < a < 1$). Os parâmetros delta f1 e delta f2 definem a largura de banda nas posições definidas por b e c respectivamente. Os parâmetros -f e f definem a gama de frequências a considerar, sendo que fc, frequência central, está definida por defeito. Os parâmetros delta f1, delta f2, -f e f são definidos em Hz.

Com esta ferramenta é então possível ao software desenvolvido desenhar um filtro de forma muito fácil e rápida e que responda às necessidades do utilizador.

4.2.2. Algoritmo *layer pelling*

O algoritmo de *layer pelling* é um algoritmo capaz de calcular a variação do índice de refração de uma rede de Bragg através do espectro de reflexão pretendido. [6]

No GOSIP (Gratings in OSIP, apêndice A) já se encontrava desenvolvida uma função eficiente para processar este algoritmo. Essa função torna então simples para o software desenvolvido calcular o índice de refração da rede de Bragg através do espectro de reflexão definido no design/importação do filtro.

Na figura 4.3 está ilustrada a função de transferência de um filtro e o resultado depois de ser aplicado o algoritmo de *layer pelling*.

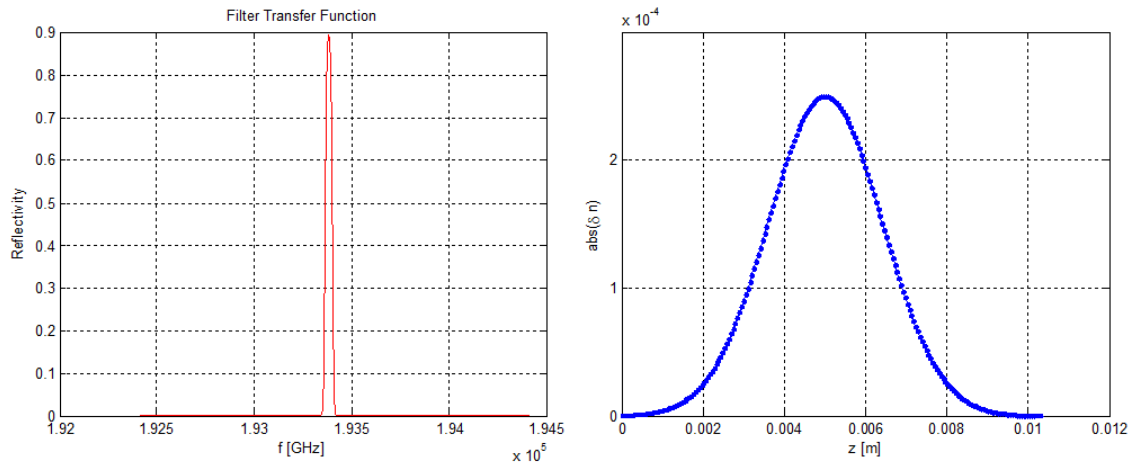


Figura 4.3. Ilustração do funcionamento do algoritmo de *layer pelling*. (esquerda) função de transferência do filtro. (direita) variação do índice de refração da rede Bragg ao longo do seu comprimento.

Em alguns casos, por exemplo caso existam *phase shifts*, a variação do índice de refração da rede Bragg devolvida pelo algoritmo de *layer pelling* não aparece centrada no comprimento da rede. Foi então acrescentado um algoritmo de correcção [7] para aplicar nesses casos. Bastando para isso ao utilizador premir um botão de rectificação. Uma destas situações está representada na figura 4.4.

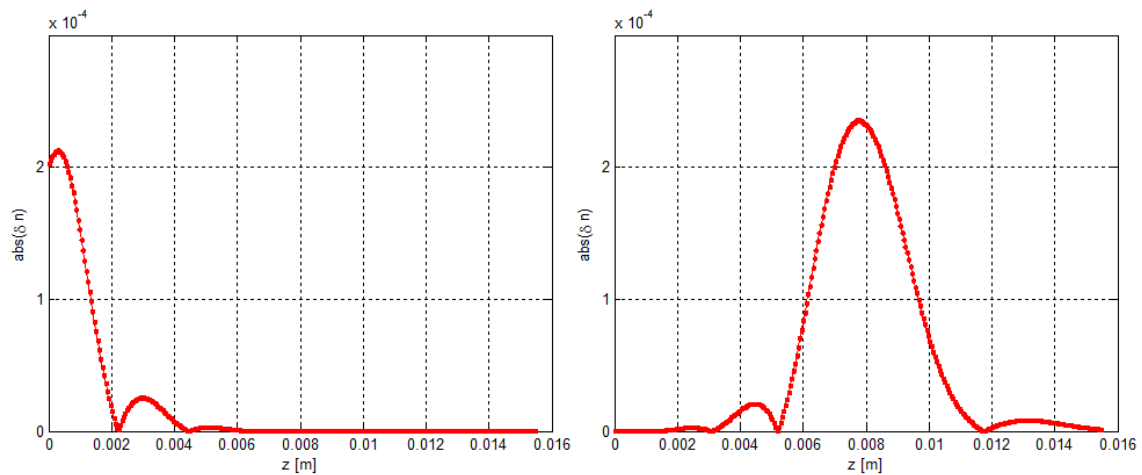


Figura 4.4. Algoritmo de *layer pelling*. (esquerda) antes da rectificação. (direita) depois da rectificação.

Como se pode observar na figura 4.4. antes da aplicação do algoritmo de rectificação a variação do índice de refração não se encontrava centrada no comprimento da rede. Após a aplicação desse mesmo algoritmo isso passou a acontecer.

Em resumo, no *software* desenvolvido é utilizado o algoritmo de *layer pelling* para calcular a variação do índice de refração da rede de Bragg a gravar.

Depois de calculado a variação do índice de refração da rede de Bragg pretendida, obtêm-se facilmente a variação da visibilidade ao longo da rede Bragg através da seguinte equação:

$$v = \frac{|dn|}{\max(|dn|)} \quad (4.1)$$

Na equação 4.1, dn representa o vector de variação do índice de refração e v representa o vector de variação da visibilidade.

Depois de obtida a variação da visibilidade ao longo da rede de Bragg, tornou-se necessário controlar o número de pontos que compõem esse mesmo vector. Para isso desenvolveu-se um algoritmo simples, baseado em interpolação linear, que permite obter o vector de visibilidade com o número de pontos desejados. Um exemplo disso está presente na figura 4.5.

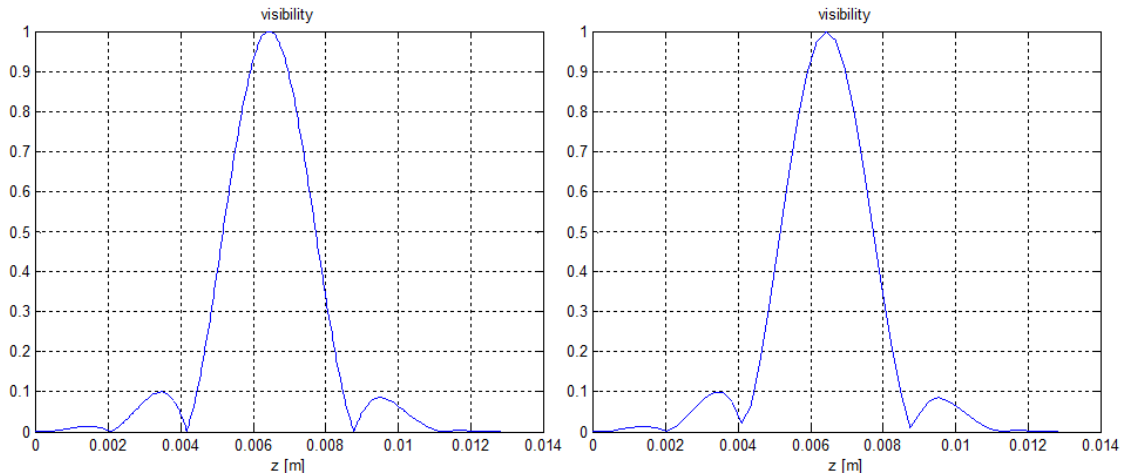


Figura 4.5. Representação do ajuste do número de pontos do vector visibilidade. (esquerda) vector original, com 200 pontos, (direita) vector ajustado, agora com 50 pontos.

Como se pode observar na figura 4.5 a variação da visibilidade não apresenta alterações significativas ao reduzir o número de pontos. Tem que se ter no entanto em conta que ao diminuir o número de pontos do vector de variação da visibilidade se está a diminuir o número de secções da rede a gravar. E que quanto menor for o número de secções, pior será a qualidade da rede gravada.

4.2.3. Método de *Stitching*

O método de *stitching*, foi o método utilizado para fazer a implementação de FBGs. Aquando o início deste trabalho já se encontrava desenvolvido um algoritmo para implementação de FBGs pelo método de *stitching* [2]. Na figura 4.6 está representado um esquema desse mesmo algoritmo.

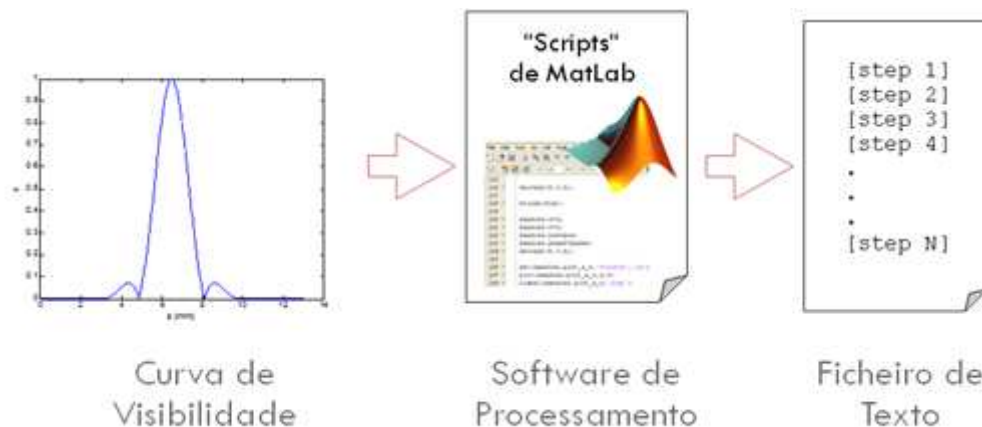


Figura 4.6. Representação esquemática do algoritmo para implementação de FBGs já desenvolvido. [2]

O algoritmo representado na figura 4.6 calcula a sequência de *steps* a serem efectuados pela carruagem de translação do sistema de gravação. Para tal tem como entrada a visibilidade da rede ao longo do seu comprimento. O algoritmo que implementa o método de *stitching* tem a designação de *Steper* (Apêndice A). [2]

O algoritmo *Steper* é o utilizado neste trabalho para, através da curva de visibilidade, obtida através do método *layer pelling* enunciado anteriormente, obter o ficheiro de *steps* necessário para efectuar a gravação.

Para além da curva de visibilidade da rede ao longo do seu comprimento, o algoritmo representado em 4.6 necessita também que lhe sejam fornecidos os *Phase Shifts* da rede. Para tal foi desenvolvido um algoritmo capaz de os calcular e fornecer automaticamente ao programa *Steper*.

Na figura 4.6 estão representados resultados devolvidos pelo programa *Steper* para uma mesma rede, variando apenas o número de secções a gravar

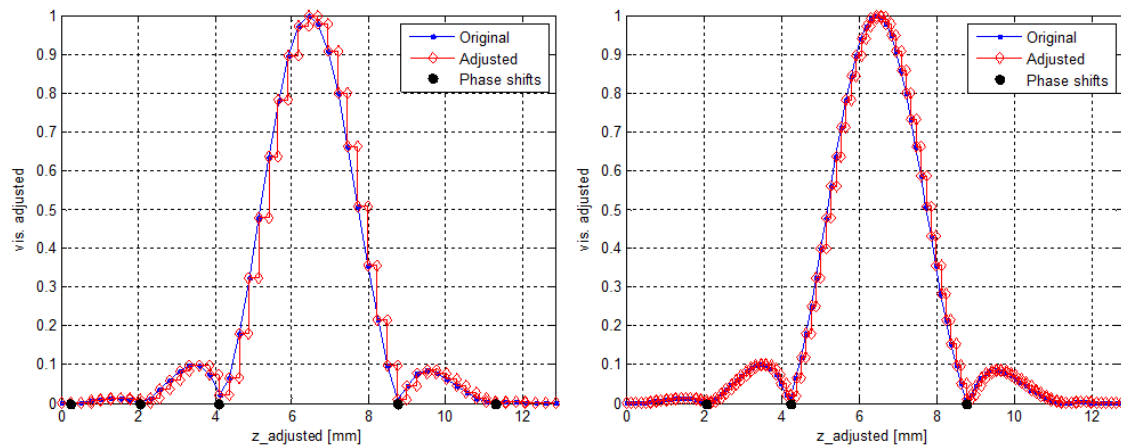


Figura 4.7. Resultados obtidos pela função *Steper* para a mesma rede Bragg. (esquerda) rede de Bragg com 50 secções. (direita) rede de Bragg com 100 secções.

Como se pode ver na figura 4.7, quanto maior o número de secções maior é a proximidade entre a visibilidade original e a visibilidade discretizada. Também é possível ver na figura 4.7 que os *phase shifts* estão a ocorrer nos locais previstos. O que permite concluir acerca do correcto funcionamento do algoritmo desenvolvido para detectar os *phase shifts*.

Para além dos resultados gráficos ilustrados na figura 4.7, a função *Steper* devolve ainda um ficheiro de texto com os *steps* necessários para efectuar a gravação no sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro.

4.3. Simulação da resposta espectral de FBGs

Numa fase inicial deste trabalho desenvolveu-se um algoritmo capaz de fazer a simulação da resposta espectral das redes Bragg. Esse algoritmo foi desenvolvido em MATLAB® e teve como base o método da matriz de transferência descrito no capítulo 2 e foi apoiado no artigo [3].

Posteriormente começou a utilizar-se um simulador de redes Bragg, de nome GOSIP (apêndice B), para fazer a simulação da resposta espectral de FBGs. Foi esse simulador que foi integrado no *software* desenvolvido, para assim ser possível fazer algumas simulações antes de se proceder à gravação da rede. Também o GOSIP efectua as simulações das redes Bragg através do método da matriz de transferência.

Na figura 4.8 e 4.9 estão ilustrados alguns resultados respectivos a simulações de redes Bragg utilizando um algoritmo baseado no método da matriz de transferência.

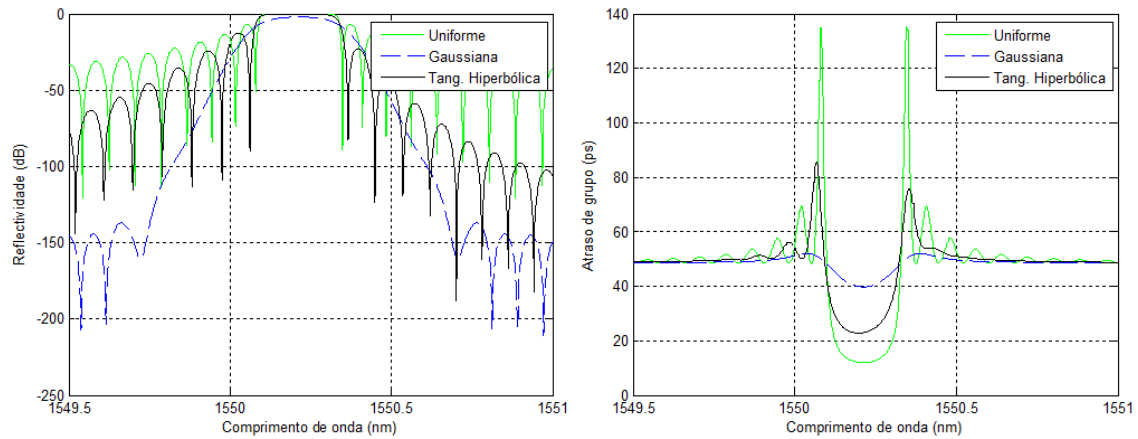


Figura 4.8. Simulação de uma rede Bragg com 10 cm, simulada com 100 secções e $\Delta n = 2 \cdot 10^{-4}$. (esquerda) reflectividade para três tipos de apodização. (direita) atraso de grupo para os mesmos três tipos de apodização.

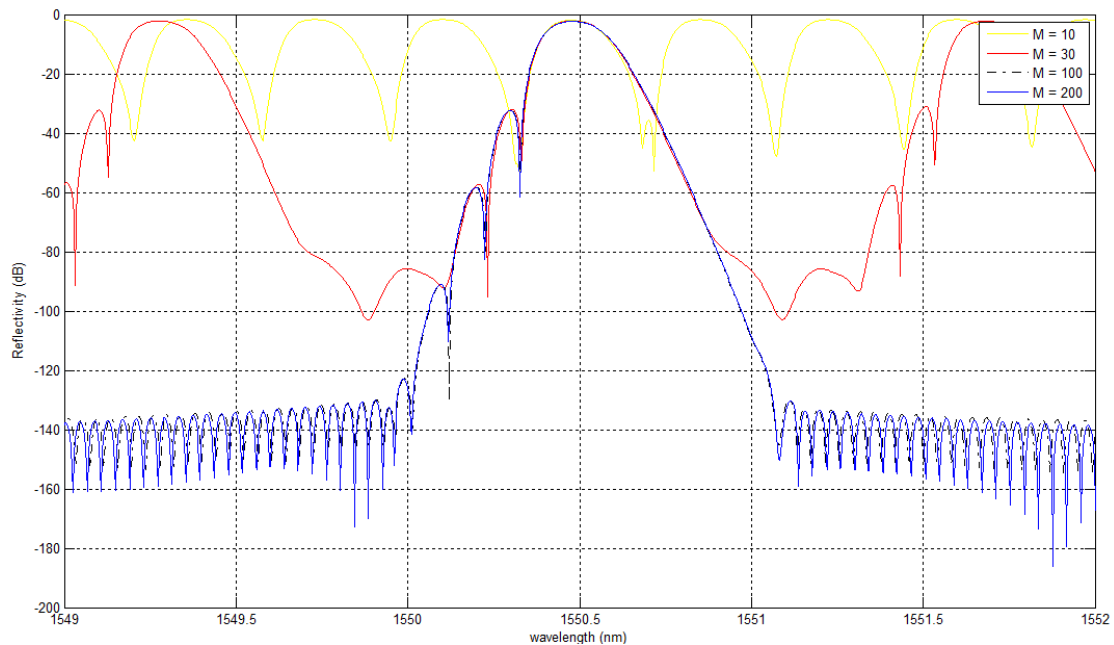


Figura 4.9. Simulação do espectro de reflexão de uma rede de Bragg com apodização gaussiana em que apenas é variado o número de secções M . O comprimento da rede é de 20 mm e $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$.

Observando a figura 4.9 é possível ver que o espectro de reflexão obtido para as 100 secções não apresenta diferenças significativas quando comparada com o espectro obtido para 200 secções. Quando começamos a reduzir o número de secções, verifica-se que o espectro na banda de reflexão é muito idêntico ao observado para os casos anteriores, no entanto observa-se o efeito de superestrutura, com réplicas de cada lado da banda de reflexão. Este efeito de superestrutura é originado pelo facto de um número de secções pequeno provocar a ocorrência de saltos bruscos no factor de acoplamento.

4.4. Desenho e gravação de FBGs

Nesta secção são apresentados alguns desenhos de redes de Bragg efectuados a partir do desenho do filtro pretendido. Comparando as redes de Bragg obtidas com o filtro que se pretendia que ela implementasse. São ainda apresentadas algumas gravações de redes de Bragg.

4.4.1. Desenho de redes Bragg

Na figura 4.10 estão representados graficamente os passos necessários para a partir do filtro pretendido obter a rede de Bragg que o implementa. Tendo a função de transferência do filtro pretendido, aplica-se o algoritmo de *layer pelling* e obtém-se a visibilidade da rede de Bragg pretendida, como já foi explicado na secção 4.2.2. De seguida a visibilidade é introduzida no simulador GOSIP e obtém-se a simulação da rede de Bragg que se implementou.

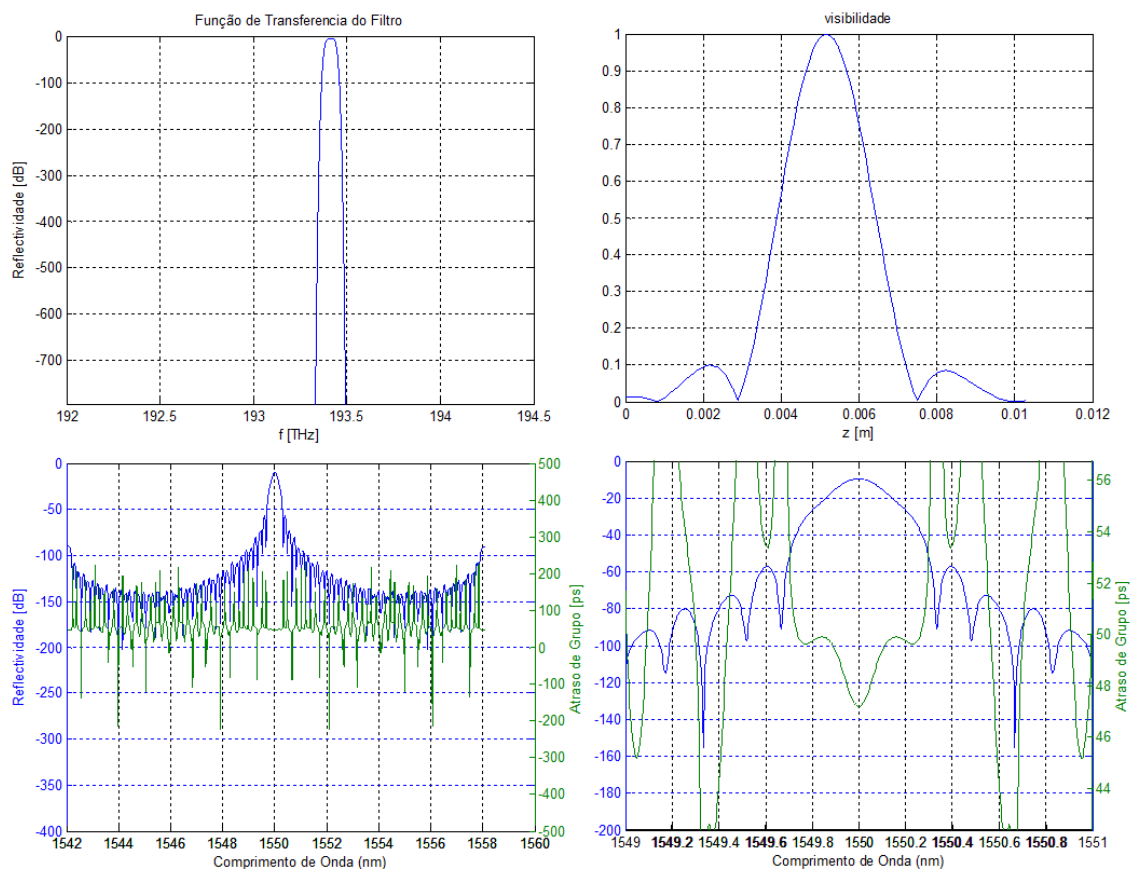
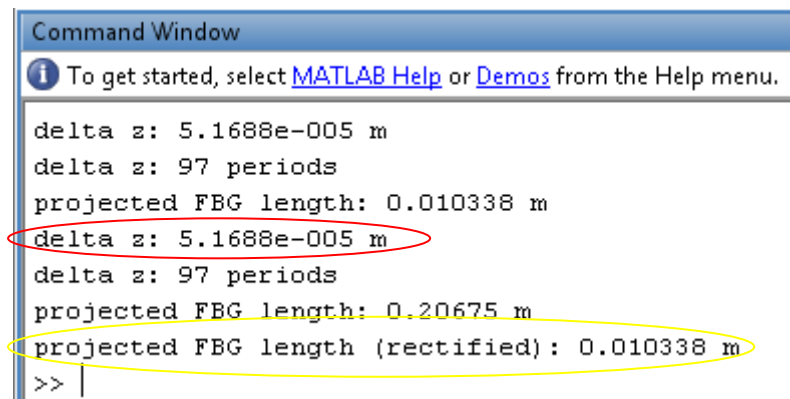


Figura 4.10. (esquerda cima) Função de transferência do filtro pretendido. (direita cima) Visibilidade calculada através do algoritmo de *layer pelling*. (esquerda baixo) Atraso de grupo e reflectividade da rede de Bragg desenhada. (esquerda direita) Simulação com mais pormenor.

Na figura 4.11 estão representados alguns valores que vão surgindo na “Command Window” do MATLAB® no decorrer deste processo.



```

Command Window

To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.

delta z: 5.1688e-005 m
delta z: 97 periods
projected FBG length: 0.010338 m
delta z: 5.1688e-005 m
delta z: 97 periods
projected FBG length: 0.20675 m
projected FBG length (rectified): 0.010338 m
>> |
  
```

Figura 4.11. Resultados que surgem na “Command Window” do MATLAB® no decorrer do processo de desenho de FBGs.

Os valores mais importantes que estão representados na figura 4.11 são, o comprimento da FBG projectada, assinalado a amarelo, e o comprimento de cada secção, assinalado a vermelho.

É também importante sobrepor a resposta em frequência da rede de Bragg com a pretendida, como se ilustra na figura 4.12.

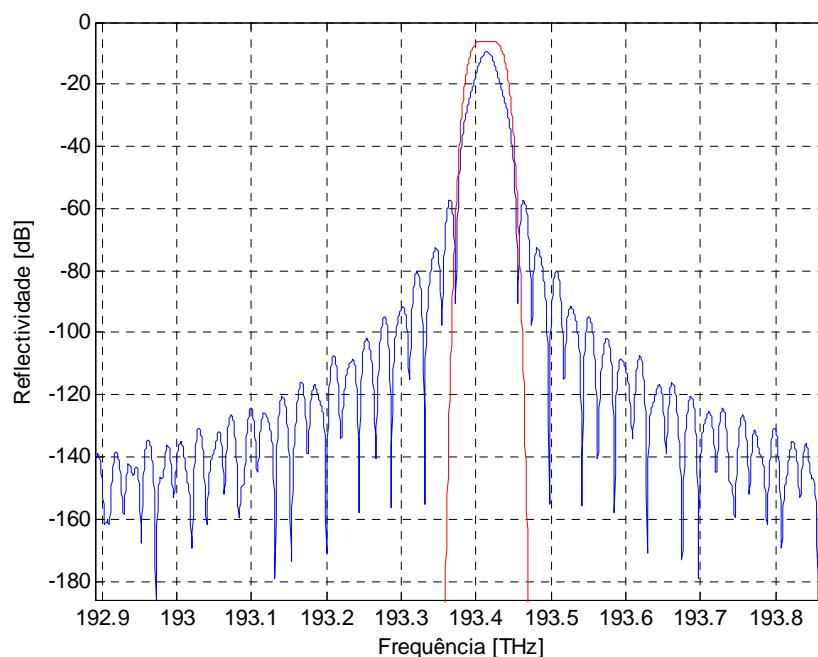


Figura 4.12. Sobreposição da função de transferência do filtro (vermelho) com a FBG desenhada (azul).

Como se pode observar através da figura 4.12, a rede de Bragg desenhada, a azul, é uma boa aproximação para o filtro pretendido, a vermelho. Apresentam largura de banda muito idêntica na banda de reflexão.

De seguida é apresentado o desenho de uma outra rede de Bragg. Agora alterando o aspecto do filtro. Na figura 4.13 está ilustrada a função de transferência do filtro e a rede de Bragg desenhada. Na figura 4.14 estão representados os valores que surgem na “Command Window” do MATLAB®.

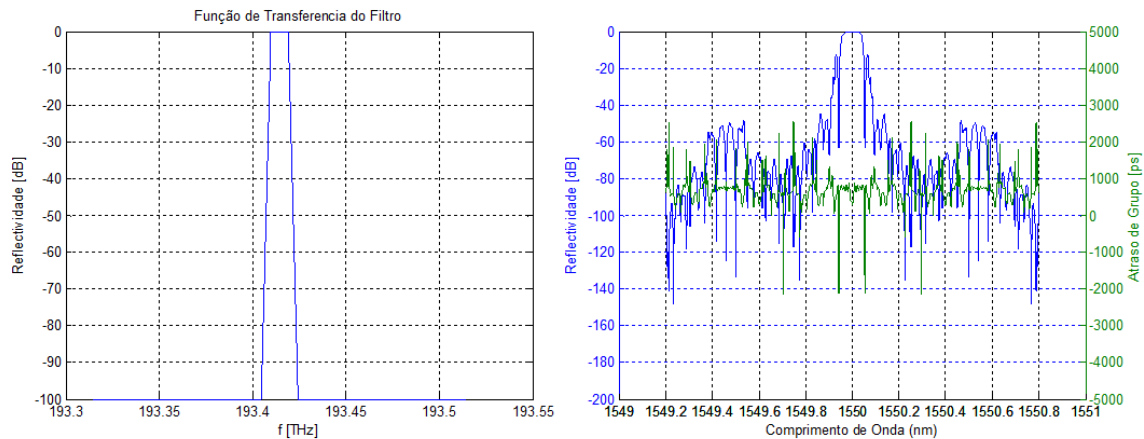


Figura 4.13. (esquerda) Função de transferência do filtro pretendido. (direita) Atraso de grupo e reflectividade da rede de Bragg desenhada.

```

Command Window
i To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.

delta z: 0.00051688 m
delta z: 967 periods
projected FBG length: 0.15507 m
delta z: 0.00051688 m
delta z: 967 periods
projected FBG length: 2.0675 m
projected FBG length (rectified): 0.15507 m
>>
  
```

Figura 4.14. Resultados que surgem na “Command Window” do MATLAB® no decorrer do processo de desenho de FBGs.

Como se pode ver a rede de Bragg desenhada para implementar o filtro representado na figura 4.13 (esquerda), tem um comprimento de 15.507 cm e cada secção da rede tem 0.51688 mm.

Para confirmar se realmente a rede de Bragg implementa o filtro pretendido, tem que se sobrepor a resposta em frequência da rede de Bragg com o filtro pretendido. O resultado dessa sobreposição está representado na figura 4.15.

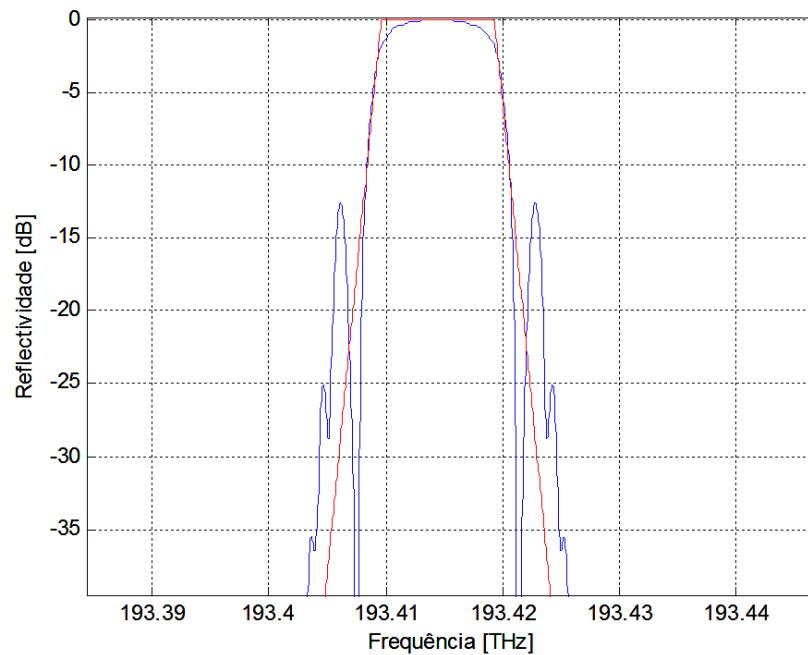


Figura 4.15. Sobreposição da função de transferência do filtro (vermelho) com a FBG desenhada (azul).

Analisando a figura 4.15, pode-se concluir que a rede de Bragg desenhada, a azul, é uma boa aproximação ao filtro pretendido, a vermelho. A largura de banda da rede Bragg desenhada é praticamente a mesma do filtro pretendido.

Fora da banda passante as rede de Bragg desenhadas apresentam atenuações muito elevadas, o que era desejável que acontecesse uma vez que se pretendiam obter filtros com atenuação completa fora da banda passante.

4.4.2. Gravações e caracterização de redes Bragg

Nesta secção são apresentadas algumas gravações de redes Bragg feitas no *Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro*. É ainda feita a comparação entre as redes gravadas e a simulação destas. Para todas as gravações foi utilizado o *software* desenvolvido.

As gravações apresentadas nesta secção dizem respeito a uma mesma rede Bragg, ou seja, todas foram desenhadas para implementar o mesmo filtro. A diferença entre elas é o número de secções com que foram gravadas.

O função de transferência do filtro que se pretendia implementar com as redes desenhadas está representada na figura 4.16.

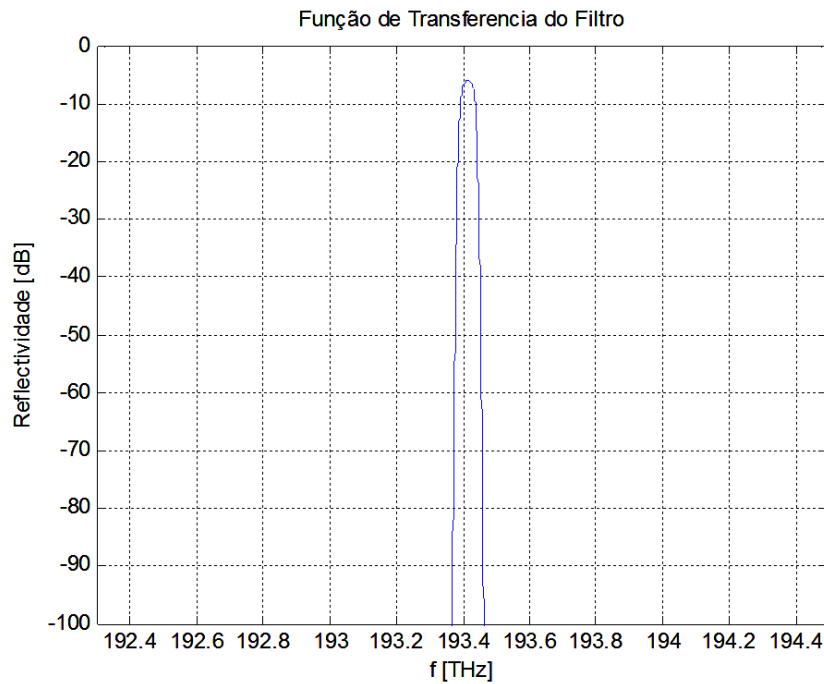


Figura 4.16. Função de transferência do filtro que se pretendia implementar.

Gravaram-se três redes de Bragg com o objectivo de implementar o filtro ilustrado em 4.16, variando apenas o número de secções. Foi feita uma gravação com 50 secções, outra com 100 e finalmente uma com 150.

Resultados para a rede Bragg com 50 secções:

Na figura 4.17 está ilustrada a resposta espectral da rede gravada e a simulação, com $M = 50$.

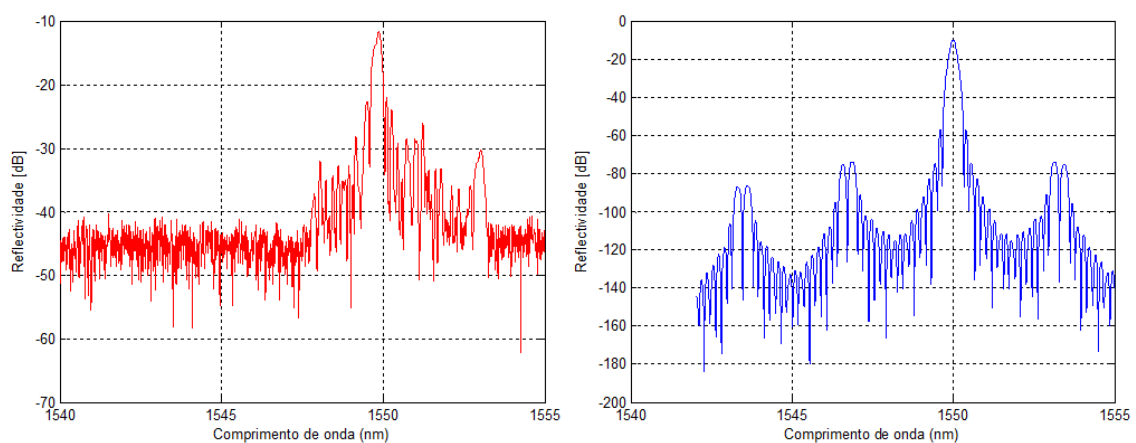


Figura 4.17. Respostas espectrais da rede de Bragg com 50 secções, (esquerda) rede gravada, (direita) rede simulada.

Na figura 4.18 está representada a sobreposição dos dois gráficos representados na figura 4.17. Assim torna-se mais fácil a comparação entre a rede gravada e a simulada.

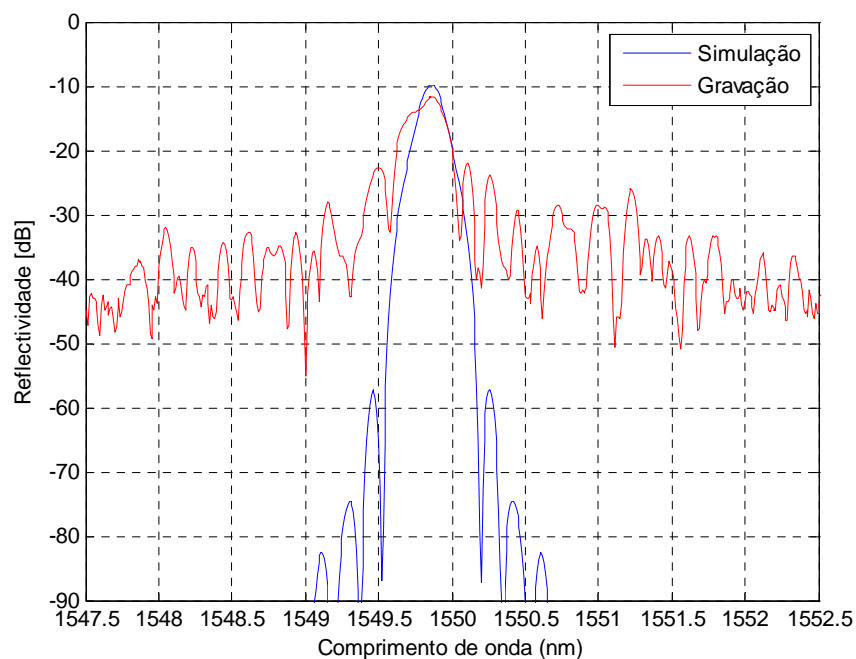


Figura 4.18. Sobreposição das duas respostas da figura 4.17.

Na figura 4.19 estão representados os atrasos de grupo, simulado e da gravação.

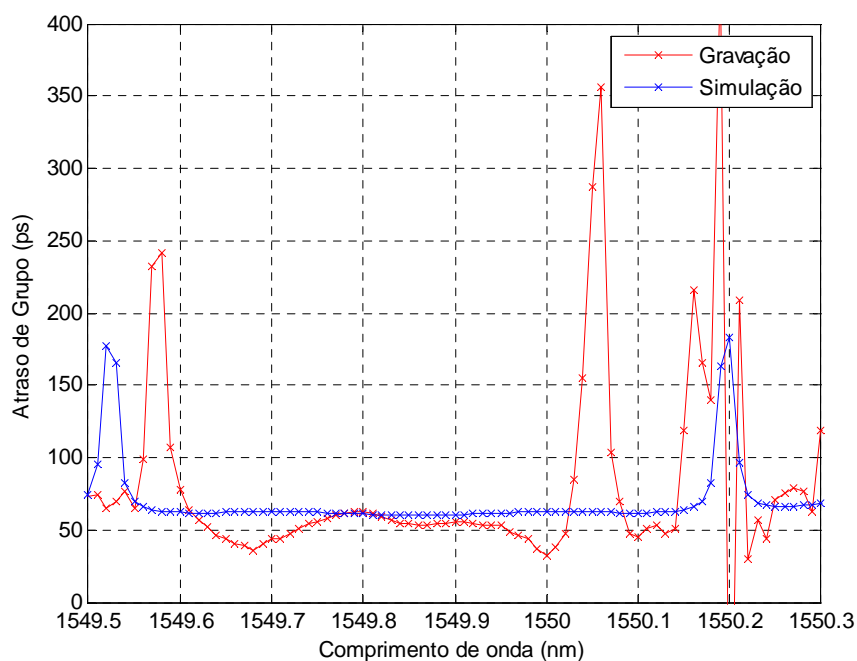


Figura 4.19. Atrasos de Grupo, da simulação e da gravação, para 50 secções.

Resultados para a rede Bragg com 100 secções:

Na figura 4.20 estão representadas as respostas espectrais das redes gravada e simulada, agora com 100 secções.

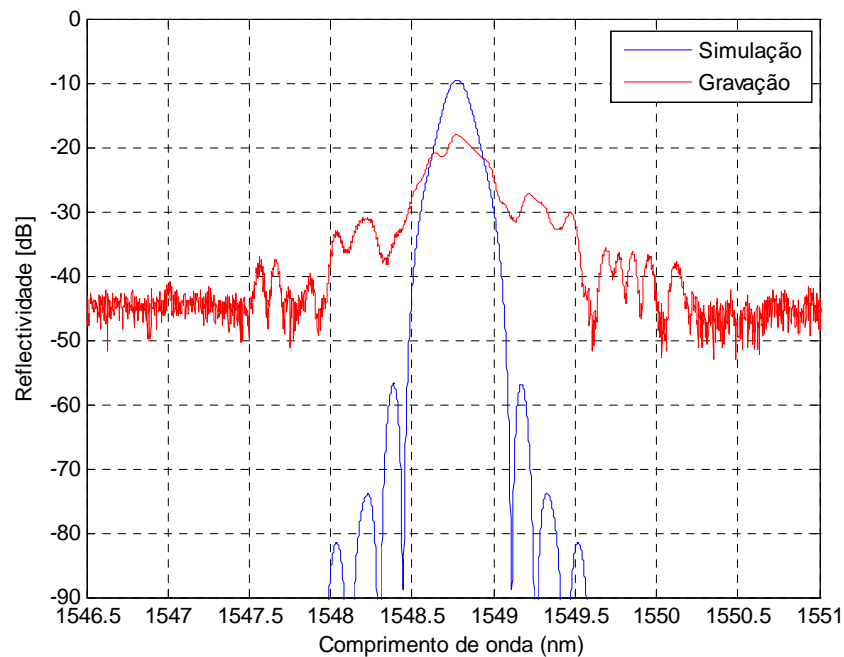


Figura 4.20. Sobreposição das respostas espectrais das redes gravada e simulada com 100 secções.

Na figura 4.21 estão representados os atrasos de grupo, simulado e da gravação.

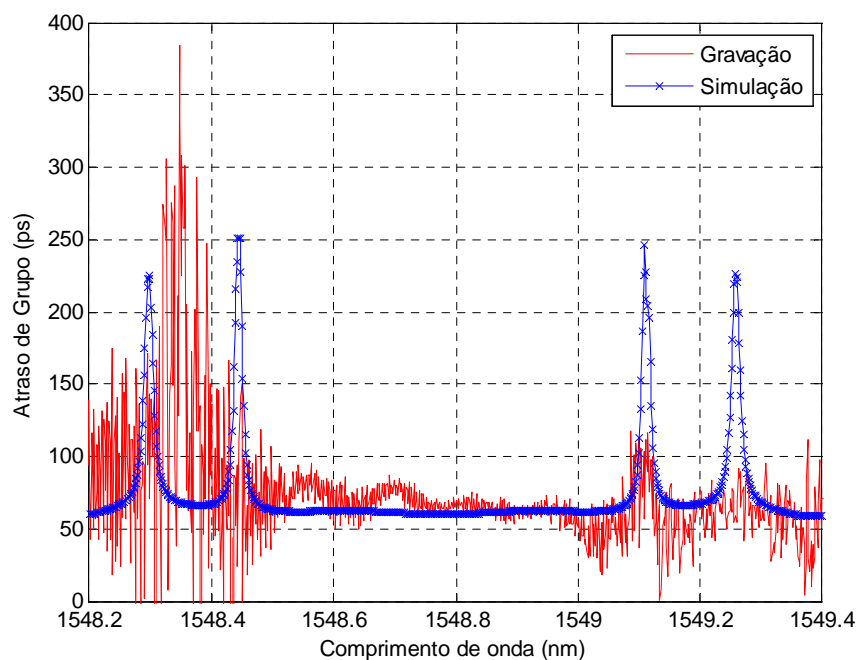


Figura 4.21. Atrasos de Grupo, da simulação e da gravação, para 100 secções.

Resultados para a rede Bragg com 150 secções:

Na figura 4.22 estão representadas as respostas espectrais das redes gravada e simulada, agora com 150 secções.

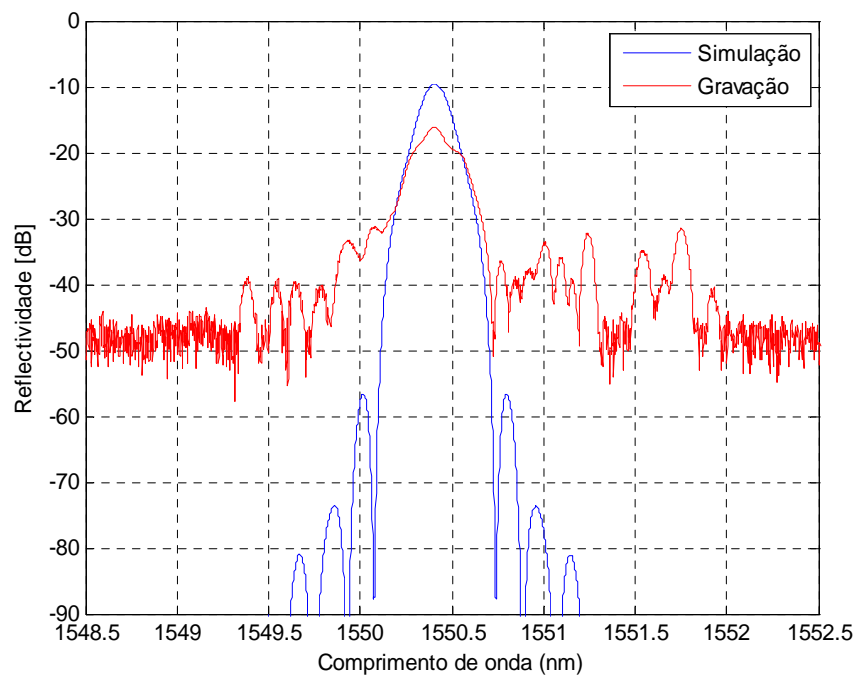


Figura 4.22. Sobreposição das respostas espectrais das redes gravada e simulada com 150 secções.

Na figura 4.23 estão representados os atrasos de grupo, simulado e da gravação.

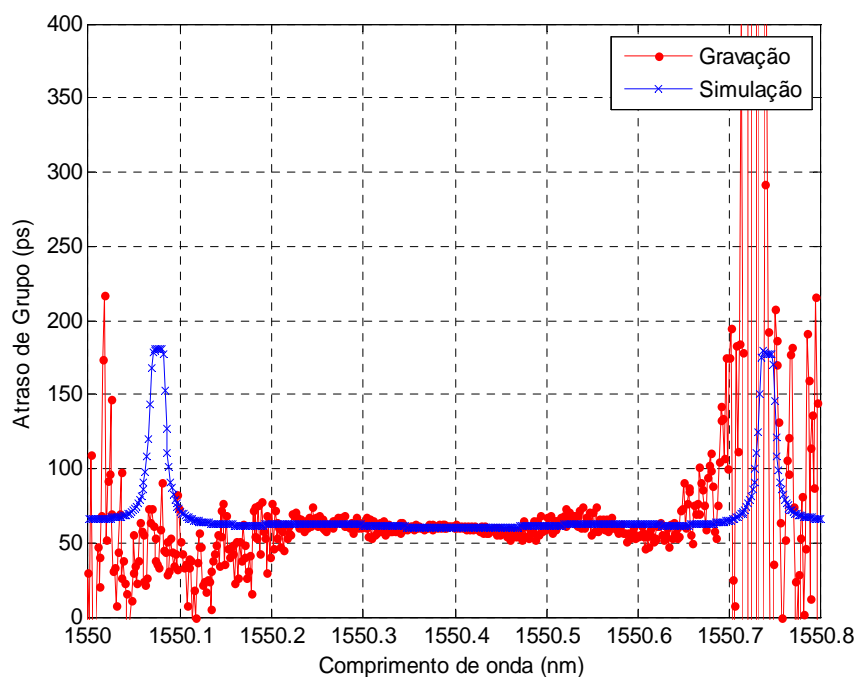


Figura 4.23. Atrasos de Grupo, da simulação e da gravação, para 100 secções.

Analisando as figuras 4.18 a 4.23, pode-se concluir que as redes simuladas são muito semelhantes às redes ideais, com atraso de grupo constante na banda de passagem. As redes de Bragg gravadas não apresentam grande qualidade. A rede gravada com 50 *steps* apresenta uma largura de banda semelhante à simulada mas a atenuação fora da banda de passagem é muito mais baixa. A rede gravada com 100 *steps* está um pouco mais degradada e apresenta mais atenuação na banda de passagem que a de 50 *steps*. A rede gravada com 150 *steps* também apresenta uma largura de banda idêntica à simulada, mas mais uma vez a atenuação fora da banda de passagem é muito mais baixa. Relativamente ao atraso de grupo na banda de passagem, as três gravações apresentam algumas flutuações. Sendo que a gravação que apresenta atraso de grupo mais próximo do simulado na banda de passagem é a gravada com 150 *steps*.

Como se pode ver na figura 4.16 o filtro que se pretendia implementar apresentava uma atenuação na banda passante de quase 10 dB. É portanto normal a *insertion loss* que surge na simulação da rede.

A resposta experimental das redes revela diferenças relativamente às simulações. Existem algumas razões que podem justificar essa diferença, o sistema de gravação ainda está em fase de implementação, pelo que existem ainda algumas instabilidades no sistema, o que impede que a visibilidade pretendida seja atingida na gravação. Assim que essa questão, alheia a este trabalho, seja resolvida, são esperadas melhoras significativas nos resultados. Por outro lado, a inclusão do efeito de não uniformidade do feixe do laser, a resposta não linear da fibra e o erro de posicionamento irão aproximar ainda mais os resultados de simulação dos experimentais.

4.5. Análise das redes de Bragg implementadas

Nesta secção são analisadas as redes de Bragg desenhadas e implementadas. Para realizar essa caracterização recorreu-se ao *software* de simulação de sistemas de comunicação ópticos VPITM.

É ainda estudado nesta secção o impacto do número de *steps* utilizados na gravação de uma rede de Bragg na resposta obtida da rede de Bragg correspondente, também este estudo é efectuado utilizando o *software* VPITM. Para efectuar este estudo mediu-se o factor Q, associado a um sinal recebido, utilizando redes de Bragg com vários números de *steps*.

Para validar a correcta importação e correcto funcionamento das redes Bragg utilizou-se a montagem esquematizada na figura 4.24.

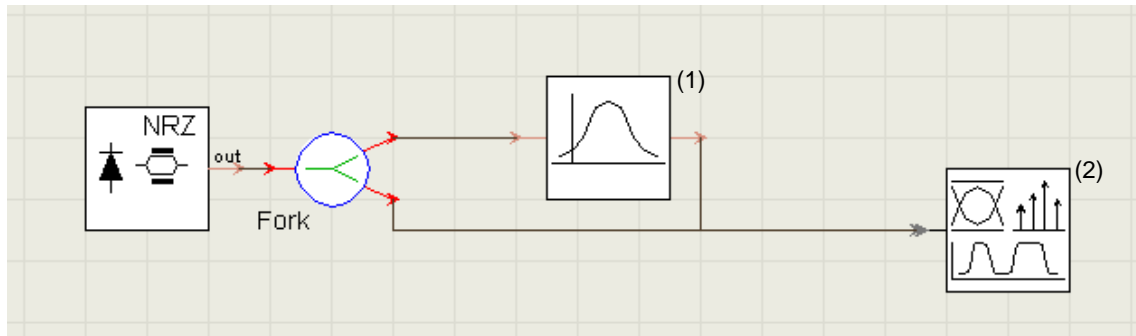


Figura 4.24. Esquema utilizado no VPITM para caracterizar as redes Bragg.

O módulo (1) na figura 4.24 representa a rede Bragg que se pretende estudar. O módulo (2) representa um OSA (Optical Spectrum Analyser). Esta simulação permite observar o sinal óptico antes de passar pela rede de Bragg e depois, permitindo assim ver se a rede de Bragg está a operar como esperado.

Na figura 4.25 está ilustrado o esquema utilizado analisar o desempenho de um sistema de comunicações ópticas. Uma forma de avaliar o desempenho de um sistema é analisar o factor Q associado ao sinal recebido. O procedimento foi exactamente esse, analisar o factor Q associado ao sinal recebido alterando o número de *steps* de gravação da rede Bragg.

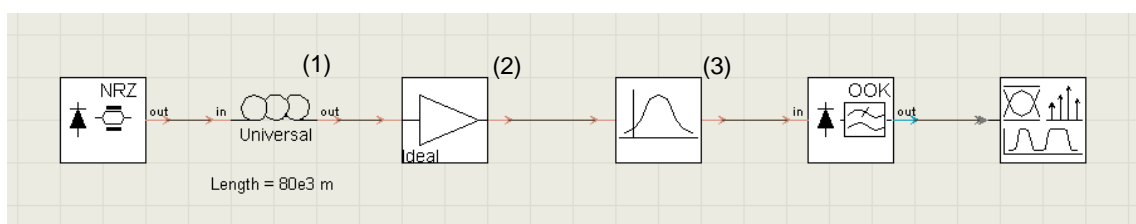


Figura 4.25. Esquema utilizado no VPITM para obter a relação entre Q e o número de secções da rede.

Na figura 4.25 está representado um esquema em que o sinal óptico atravessa 80 km de fibra (1), depois é amplificado por um EDFA (2) e finalmente é filtrado pela nossa rede de Bragg (3). Neste ponto é medido o factor Q associado ao sinal.

Todas as simulações foram efectuadas com um *bit rate* de 10Gbit/s e o laser a emitir a uma frequência de 193,1 THz.

4.5.1. Resposta espectral das redes Bragg desenhadas

Na figura 4.26 está representada a reflectividade de uma rede de Bragg desenhada e na figura 4.27 está representado o resultado da simulação obtida com o VPITM, utilizando o esquema da figura 4.24.

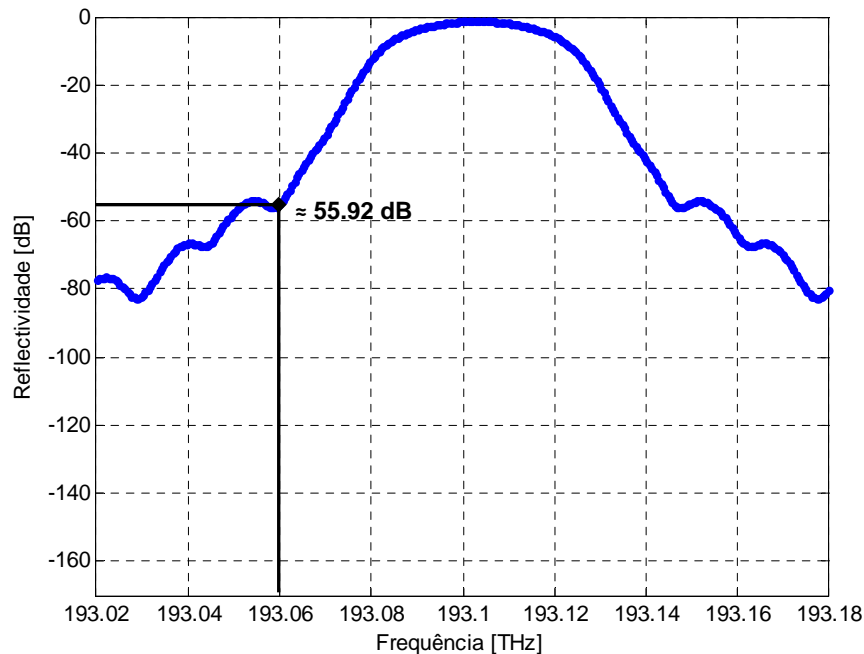


Figura 4.26. Reflectividade de uma rede de Bragg desenhada.

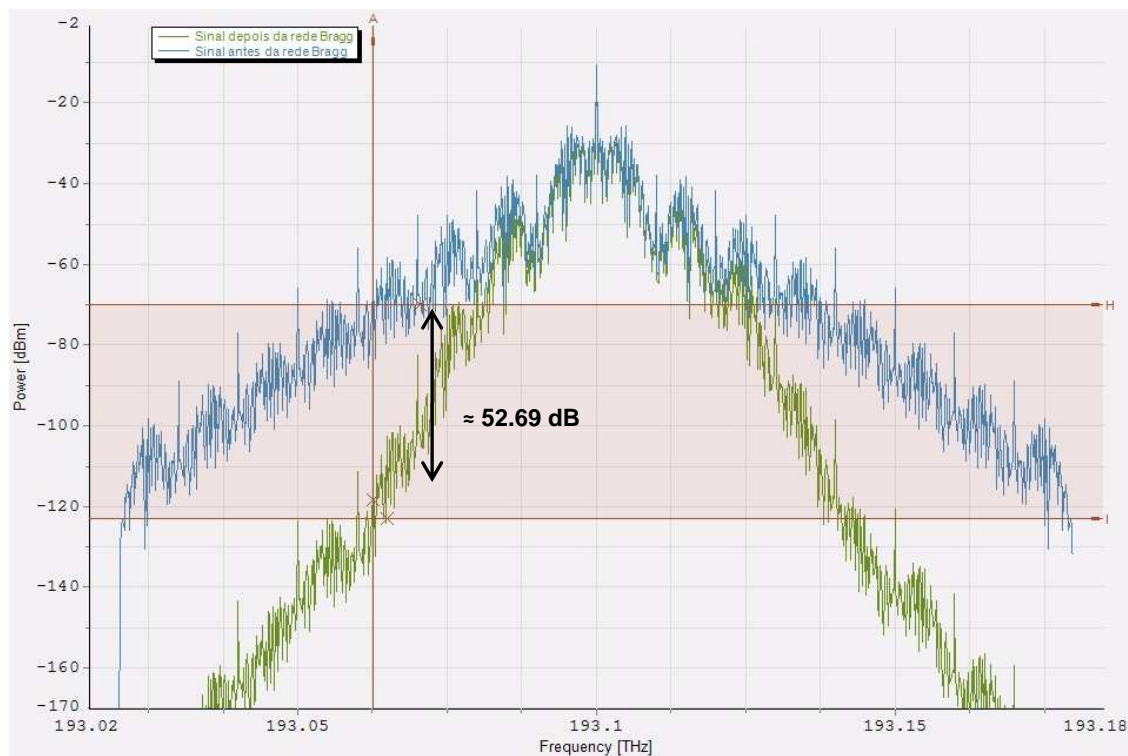


Figura 4.27. Resultado da simulação com o VPITM, para a rede ilustrada em 4.26.

Para facilitar a análise, mediu-se a atenuação que a rede desenhada deveria provocar à frequência de 193.06 THz, figura 4.26. No resultado da simulação registou-se a potência do sinal, também à frequência de 193.06 THz, entre o sinal antes e depois da rede de Bragg, figura 4.27.

Como se pode observar na figura 4.26, a atenuação que a rede de Bragg desenhada deveria provocar a 193.06 THz era de aproximadamente 56 dB. Na figura 4.27 observa-se que a diferença de potência entre o sinal à entrada da rede de Bragg e à saída é de aproximadamente 53 dB, ou seja, ao passar pela rede de Bragg o sinal ficou atenuado 53 dB a 193.06 THz. Fazendo a mesma análise mas agora para a frequência central, 193.1 THz, na figura 4.26 vê-se que a atenuação deverá ser aproximadamente 0 dB, e observando os sinais na figura 4.27 verifica-se que não há diferenças significativas de potência a essa frequência, ou seja a rede de Bragg está a atenuar aproximadamente 0 dB como seria de esperar.

Através destes resultados é então possível atestar o correcto funcionamento da rede de Bragg desenhada.

Na figura 4.28 está representada a reflectividade de uma outra rede de Bragg desenhada, agora com uma banda de passagem mais estreita.

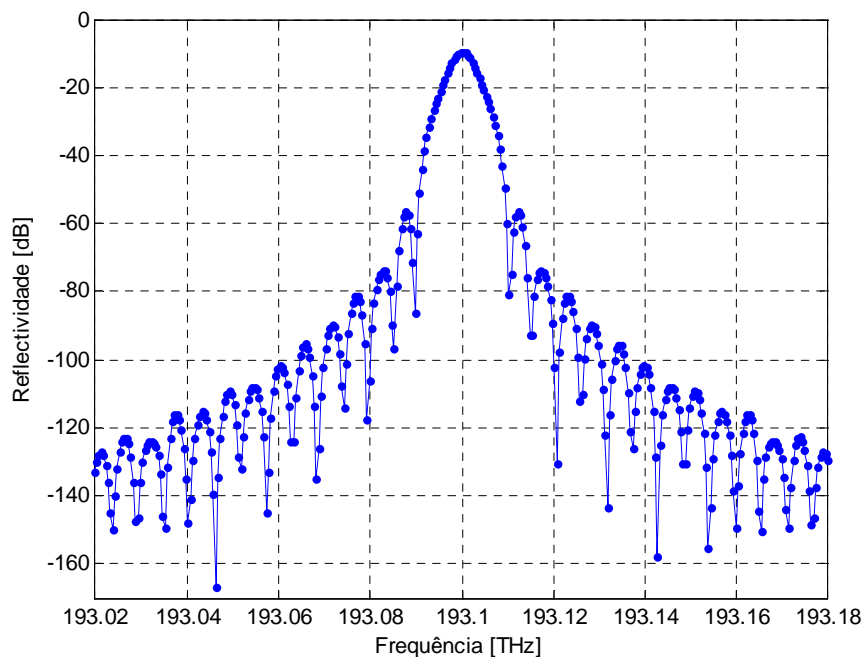


Figura 4.28. Reflectividade de uma rede de Bragg desenhada.

A banda de passagem da rede representada em 4.28 é mais estreita do que a da rede representada em 4.26. A rede representada na figura 4.28 apresenta também alguma atenuação na banda de passagem, coisa que não acontece na rede representada na figura 4.26. Na figura 4.29 estão representados os resultados da simulação para esta rede.

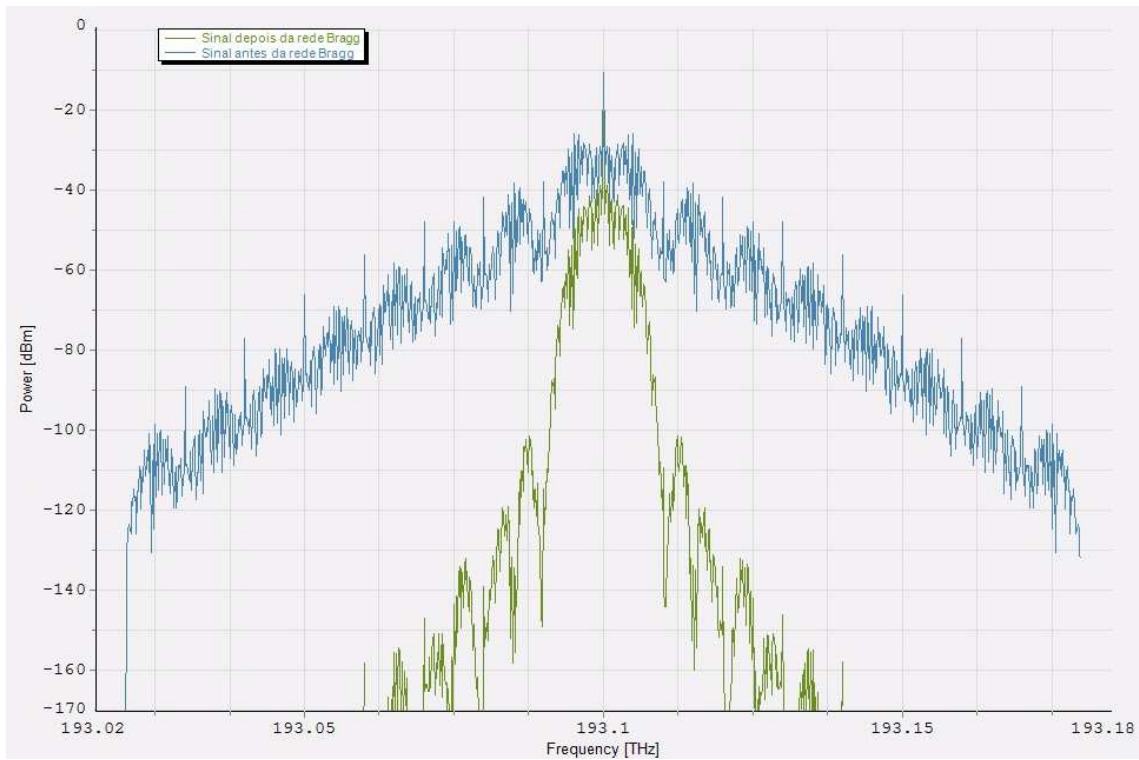


Figura 4.29. Resultado da simulação com o VPITM, para a rede ilustrada em 4.28.

Analisando a figura 4.28 pode-se ver que como era de esperar a banda de passagem para este caso apresenta alguma atenuação e é muito mais estreita. Analisando a figura 4.28 e 4.29 é possível concluir que a rede Bragg desenhada está a filtrar de acordo como previsto.

4.5.2. Impacto do número de Steps

Nesta subsecção são apresentados os resultados das simulações efectuadas para avaliar o desempenho de um sistema de comunicações ópticas ilustrado em função do número de *steps* utilizados para a gravação da rede de Bragg. Para efectuar esse estudo utilizou-se a montagem ilustrada na figura 4.24 e registou-se o factor Q associado ao sinal de saída. Utilizou-se uma rede de Bragg com diferente número de *steps*.

Foram realizados dois estudos. O primeiro com uma rede de Bragg com as características espectrais apresentadas na figura 4.30.

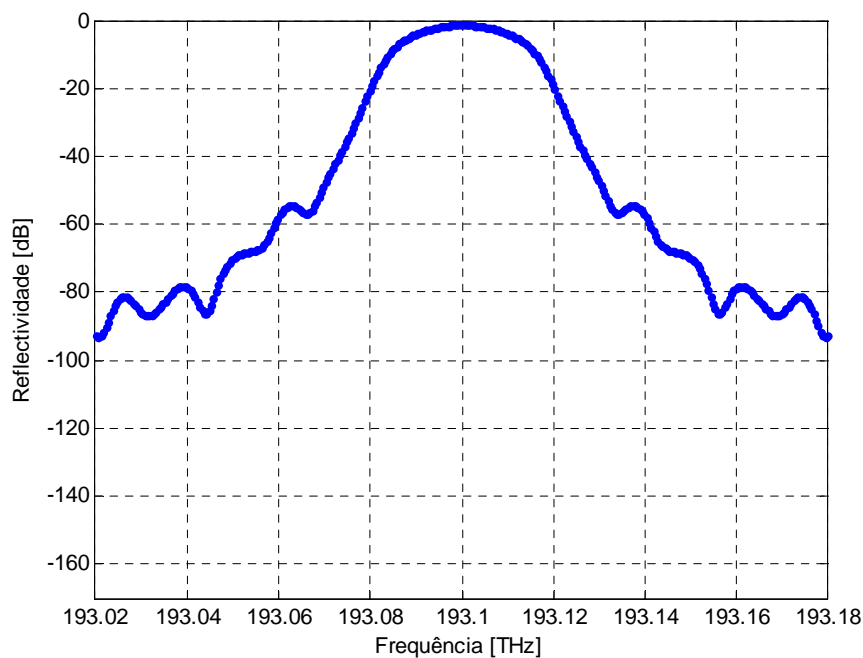


Figura 4.30. Reflectividade da rede de Bragg utilizada no primeiro estudo. Com 100 steps.

Na figura 4.31 estão ilustrados os resultados para este primeiro estudo.

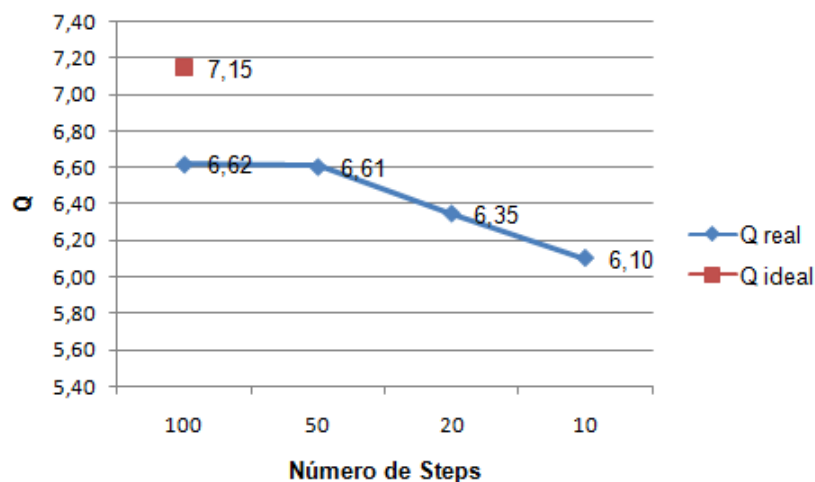


Figura 4.31. Factor Q em função do número de steps da rede Bragg.

Analisando a figura 4.31 verifica-se que o factor Q diminui com a diminuição dos *steps* de gravação da rede Bragg. Quanto menor for o número de *steps* de gravação da rede Bragg pior é a resposta da rede, portanto o decréscimo do factor Q com a diminuição do número de *steps* era esperada.

No gráfico da figura 4.31 aparece ainda um valor de Q ideal igual a 7,15. Este valor corresponde a fazer a simulação sem nenhum filtro, neste caso sem a rede Bragg.

De notar que a rede de Bragg utilizada para este estudo não apresenta *insertion loss*.

O segundo estudo foi realizado utilizando uma rede de Bragg com as características espectrais apresentadas na figura 4.32.

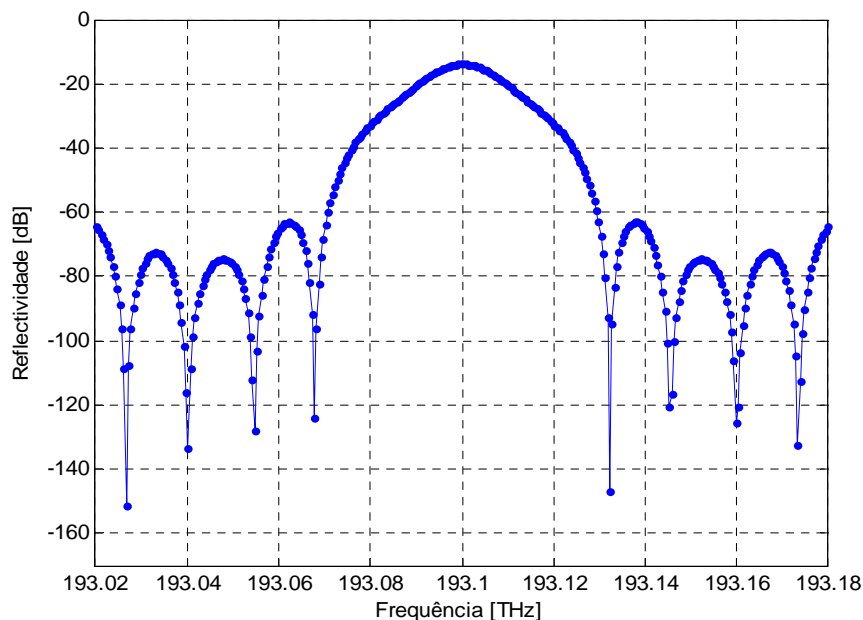


Figura 4.32. Reflectividade da rede de Bragg utilizada no segundo estudo.

Na figura 4.33 estão ilustrados os resultados para o segundo estudo.

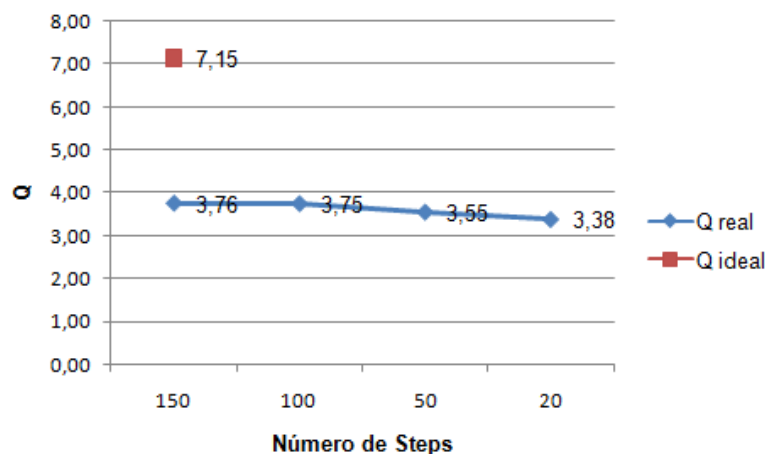


Figura 4.33. Factor Q em função do número de steps da rede Bragg.

A principal diferença deste segundo estudo para o primeiro, é o facto de a rede de Bragg utilizada neste estudo apresentar uma *insertion loss* algo elevada. Este facto faz com que o factor Q passe de 7.15 para 3.76 ao colocar o filtro. Neste caso não se verifica um decréscimo significativo do factor Q com a diminuição do número de *steps*, devido à elevada *insertion loss* da rede.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

No decorrer deste trabalho foi desenvolvido um *software* capaz de calcular os *steps* de gravação de uma rede de Bragg em fibra óptica, a partir do filtro que se pretende que a rede Bragg implemente. Neste âmbito, o trabalho desenvolvido pode ser dividido nas seguintes fases: estudo teórico das redes Bragg, ambientação com o sistema de gravação existente, estudo teórico do método de *stitching*, desenvolvimento do *software*, simulação da resposta espectral de redes Bragg, desenho e gravação de diferentes redes Bragg e caracterização das redes de Bragg desenhadas.

O estudo teórico das redes de Bragg em fibra óptica foi iniciado no capítulo 2, neste capítulo foi estudado o princípio de funcionamento das redes Bragg, foram ainda estudadas as características espectrais e espaciais das redes. Finalmente neste capítulo foi apresentado um método para efectuar a simulação de qualquer tipo de rede Bragg em fibra óptica, o método da matriz de transferência.

No terceiro capítulo foram apresentadas as técnicas de gravação de redes Bragg mais comuns, máscara de fase, e interferómetro e foi apresentado a forma de efectuar a gravação de redes longas. Finalmente foi apresentado o sistema de gravação implementado no *Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro* e o método de gravação utilizado, método de *stitching*.

No quarto capítulo foi desenvolvido o *software* que serve de apoio à gravação de redes de Bragg. Esse software permite desenhar ou importar o filtro que se pretende implementar. A partir do filtro pretendido e aplicando o algoritmo de *layer pelling* obtém-se a perturbação que é necessário gravar para o implementar. Foi apresentado também neste capítulo um algoritmo que aplica o método de *stitching*. Utilizou-se um simulador baseado no método da matriz de transferência para efectuar simulações da resposta espectral das redes de Bragg. De seguida foram efectuados desenhos de algumas redes de Bragg,

utilizando o *software* desenvolvido, e algumas dessas redes de Bragg desenhadas foram gravadas. Compararam-se as respostas das redes gravadas com as simuladas. Finalmente foi feita a caracterização de algumas redes desenhadas, para isso foi utilizado um simulador de sistemas de comunicações ópticos, o VPITM. Também com o VPITM foi estudado o impacto do número de *steps* de gravação na resposta obtida da rede de Bragg correspondente, medindo para isso o factor Q associado a um sinal de saída.

O *software* desenvolvido está disponível numa interface gráfica relativamente simples, em que se define o filtro e alguns parâmetros relativos à rede e ele faz a simulação da resposta da rede e gera o ficheiro de *steps* para a carruagem de translação do sistema de gravação. Foi também iniciada a implementação de um menu de ajuda, mas ainda com poucas opções.

Analisando as simulações efectuadas com o simulador de redes Bragg baseado no método da matriz de transferência, conclui-se que quanto maior o número de *steps* melhor é a resposta espectral da rede. No entanto quanto maior for o número de *steps* da rede, maior é o tempo de gravação da mesma.

Relativamente às simulações efectuadas com o VPITM, concluiu-se que as redes de Bragg desenhadas estavam a funcionar correctamente. Quanto ao estudo do impacto do número de *steps* no factor Q associado ao sinal de saída, concluiu-se que quanto maior for o número de *steps* utilizados na implementação da rede, melhor é o factor Q.

Relativamente às redes gravadas, verificou-se a existência de diferenças significativas nas respostas espectrais relativamente às simulações. Isto pode dever-se ao facto de o posicionador do sistema de gravação estar com alguns problemas. Quando esses problemas forem ultrapassados é provável que as respostas espectrais das redes gravadas sejam mais próximas das simuladas.

5.2. Trabalho futuro

O *software* desenvolvido pode ainda ser alvo de alguns melhoramentos e funcionalidades. Algumas das propostas futuras são as seguintes:

- Criar um menu de ajuda completo, de forma a ser possível qualquer pessoa utilizar o *software*.

Outras propostas para trabalho futuro, a realizar quando o posicionador do sistema de gravação estiver a funcionar correctamente, são as seguintes:

- Gravação de novas redes de Bragg;
- Caracterização e teste dessas mesmas redes em laboratório;
- Comparação com as simulações e conclusão quanto à correcta implementação das mesmas.

APÊNDICE A

Steper

A função *Steper* é um algoritmo desenvolvido em MATLAB® que calcula a sequência de *steps* necessários ao sistema de gravação a partir da curva de visibilidade da rede que se pretende gravar.

O algoritmo recebe como entrada um ficheiro de texto com o seguinte formato:

0.0000000000000000e+000	1.4519149753359410e-020	3.1415926535897931e+000
4.0004000400040005e-006	7.5223381577645266e-008	0.0000000000000000e+000
8.0008000800080011e-006	1.5190656532632704e-007	0.0000000000000000e+000
1.2001200120012002e-005	2.3006787361289171e-007	0.0000000000000000e+000
1.6001600160016002e-005	3.0972579266624286e-007	0.0000000000000000e+000
2.0002000200020003e-005	3.9089897346024479e-007	0.0000000000000000e+000
2.4002400240024003e-005	4.7360623259717724e-007	0.0000000000000000e+000
2.8002800280028007e-005	5.5786655318836615e-007	0.0000000000000000e+000
3.2003200320032004e-005	6.4369908573503205e-007	0.0000000000000000e+000
:	:	:
:	:	:

Figura A.1. Exemplo de um ficheiro de texto que a função *Steper* aceita como entrada.

Na primeira coluna do ficheiro texto são colocados os valores do deslocamento, em metros, na segunda coluna os valores da visibilidade correspondente à posição da rede e na terceira coluna são colocados os *phase shifts*.

Depois de carregado correctamente o ficheiro anterior, são efectuados os cálculos necessários para gravar a rede. Este algoritmo utiliza o método de *layer pelling*.

O algoritmo tem como saída um ficheiro de texto com apenas uma coluna em que constam os valores dos deslocamentos a efectuar pela carruagem de translação do sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro. Um desenvolvimento detalhado de como são efectuados os cálculos necessários a obter esse ficheiro está presente em [2] e [5].

O ficheiro texto que a função *Steper* gera tem o seguinte formato:

```

0.0000000000000000e+000
2.6624999999999999e-007
9.9843750200246162e-005
2.6624959950770199e-007
9.9843750704350313e-005
2.6624899179169982e-007
9.9843751448556482e-005
2.6624811109535259e-007
9.9843752505347571e-005
.
.
.

```

Figura A.2.Exemplo de um ficheiro de texto gerado pela função Steper.

É o ficheiro com o formato apresentado em A.2 que o sistema de gravação implementado aceita.

Quanto mais pontos tiver o ficheiro de entrada, mais pontos irá ter o ficheiro de saída da função *Steper* (que corresponde ao ficheiro de entrada do sistema de gravação). Portanto, se considerarmos uma mesma rede e se variarmos o número de pontos com que passamos a sua visibilidade para a função *Steper*, variamos também o número de *steps* que o sistema de gravação vai efectuar para efectuar a gravação da rede. E quantos mais pequenos forem os *steps* do sistema de gravação, ou seja quanto mais *steps* forem efectuados, melhor será a qualidade da rede gravada e maior será o tempo de gravação.

APÊNDICE B

GOSIP (*Gratings in OSIP*)

O GOSIP é um simulador de redes Bragg desenvolvido em MATLAB® e que utiliza a plataforma de simulação óptica OSIP (Optical Simulation Platafform).

O GOSIP pode ser facilmente explicado como um conjunto de funções desenvolvidas em MATLAB®. Essas funções podem dividir-se em três grupos, pré-análise, simulação da rede e pós-análise.

A principal função deste simulador é a função *Gosip*, que simula a resposta espectral de uma rede Bragg. Esta função utiliza o método da matriz de transferência descrito na secção 2.5.1 para fazer a simulação de todo o tipo de redes, à excepção das redes uniformes.

Na figura B.1 estão esquematizadas todas as funções que constituem o simulador.

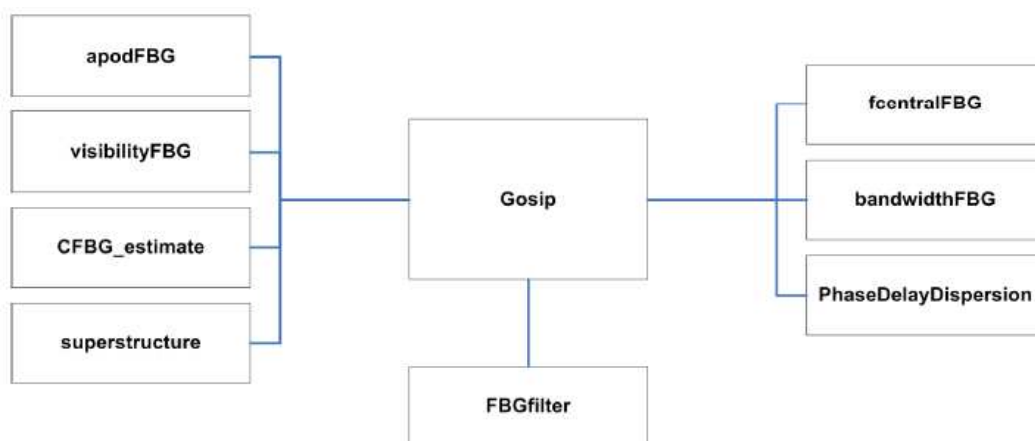


Figura B.1. Esquema das funções que constituem o *Gosip*. [2]

Podemos então definir como funções de pré-análise as funções do lado esquerdo da imagem B.1, *apodFBG*, *visibilityFBG*, *CFBG_estimate* e

superstructure. Estas funções servem para definir parâmetros necessários à simulação como a apodização, a visibilidade, aperiodicidade e estruturação.

As funções de pós-análise são as funções do lado direito da imagem B.2, *fcentralFBG*, *bandwithFBG* e *PhaseDelayDispersion*. Estas funções servem para analisar a resposta espectral calculada pela função *Gossip*. Com estas funções pode-se então determinar a resposta de fase, atraso de grupo, dispersão, largura de banda e frequência central.

A função *FBGfilter*, é responsável por fazer a ligação com o OSIP.

APÊNDICE C

VGOSIP (*Visual GOSIP*)

O *software VGosip* foi o *software* desenvolvido ao longo desta dissertação. O *software VGosip* conjuga as principais funcionalidades do simulador *Gosip* e do algoritmo *Steper*. Este *software* permite a fazer o desenho do filtro pretendido ou importar uma função de transferência, simular a resposta da rede de Bragg a gravar e calcular a sequência de *steps* necessários ao sistema de gravação.

O *software* está dividido em quatro separadores, *Filter*, *Layer Peeling*, *Steper* e *Results*. Na figura C.1 está ilustrado o *software*.

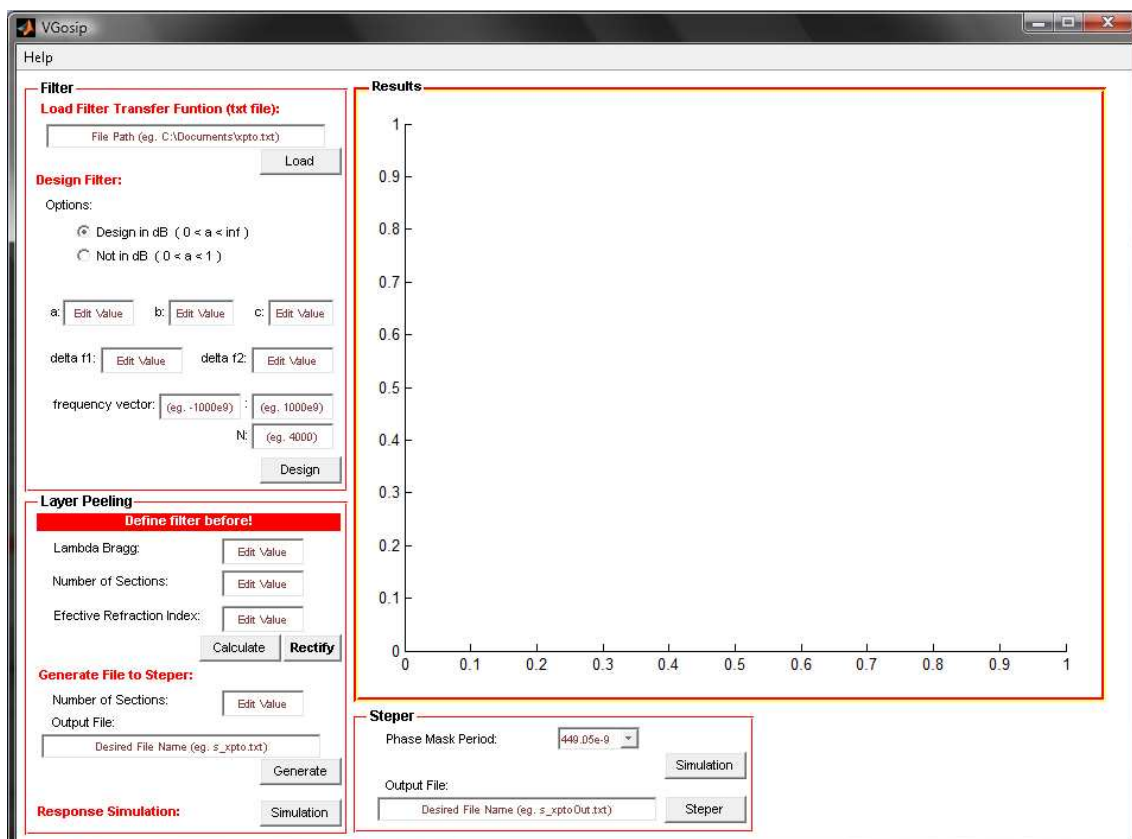


Figura C.1. Aspecto do software VGosip.

No separador “*Results*”, vão sendo apresentados alguns resultados, simulações e ajudas.

No separador “*Filter*”, figura C.2, define-se o filtro. Por importação da função de transferência ou desenhando-se. Para se desenhar o filtro é necessário preencher os parâmetros presentes na figura C.2 (esquerda) de acordo com o desenho do filtro que se consegue desenhar, figura C.2 (direita).

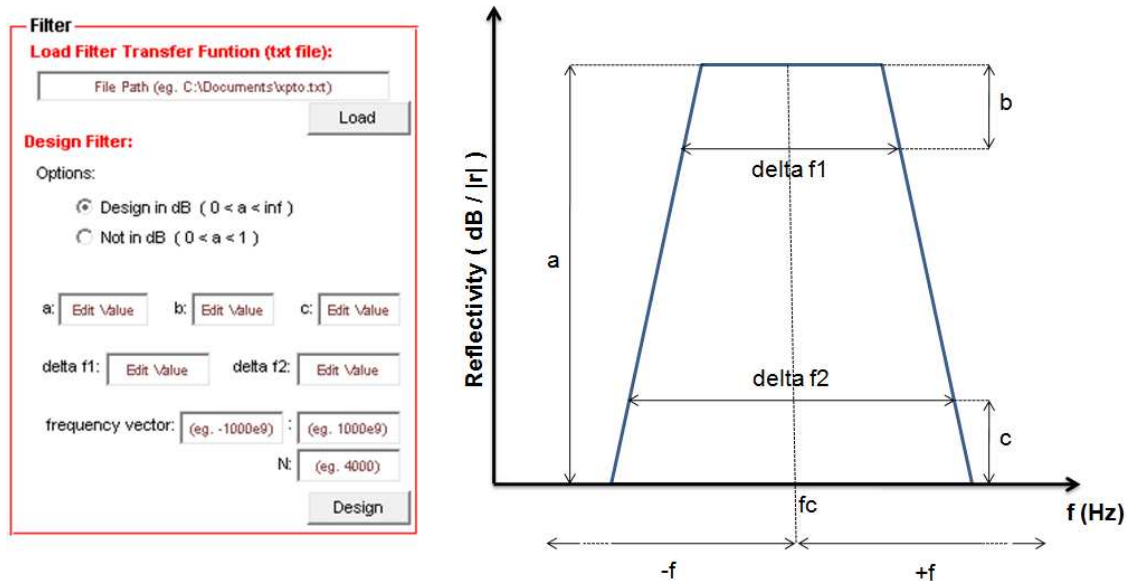


Figura C.2. (esquerda) Separador “*Filter*” do software VGosip. (direita) Aspecto do filtro que se consegue desenhar com este algoritmo.

Através da figura C.2 facilmente se faz a correspondência entre os valores a preencher do separador “*Filter*” e o filtro desejado.

No separador “*Layer Peeling*”, figura C.3, têm que ser preenchidos os campos necessários para aplicar o algoritmo de *layer pelling*. Depois de aplicado esse algoritmo é possível obter o ficheiro para o algoritmo *Steper* com o número de *steps* que desejarmos, bastando para isso variar o valor do “*Number of Sections*” assinalado a amarelo. No campo “*Outup File*”, coloca-se o nome com que se quer gravar o ficheiro de entrada da função *Steper*, com a atenção que se tem de colocar a extensão .txt. Finalmente se for premido o botão “*Simulation*” é feita a simulação da rede a gravar.

Layer Peeling

Define filter before!

Lambda Bragg:

Number of Sections:

Effective Refraction Index:

Generate File to Steper:

Number of Sections:

Output File:

Response Simulation:

Figura C.3. Separador “Layer Peeling” do software VGosip.

O campo “Number of Sections” assinalado a vermelho, altera o comprimento da rede. Deverá ser ajustado conforme o necessário tendo em conta os resultados que aparecem no separador “Results”.

No separador “Steper”, figura C.4, tem que ser escolhido o período da máscara de fase a utilizar na gravação. É possível também fazer uma nova simulação, de acordo com a máscara de fase escolhida. Finalmente coloca-se o nome com que se pretende gravar o ficheiro de steps que vai servir de entrada ao sistema de gravação, atenção à extensão .txt, e prime-se o botão “Steper”. Em caso de sucesso aparece uma mensagem a dizer que o ficheiro foi gravado com sucesso, figura C.5.

Steper

Phase Mask Period:

Output File:

Figura C.4. Separador “Steper” do software VGosip.

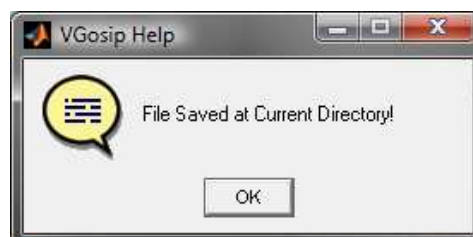


Figura C.5. Mensagem que indica que o ficheiro foi gerado com sucesso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rogério Nunes Nogueira. “*Redes de Bragg em Fibra óptica*”. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2005.

- [2] Ana Vanessa Guindeira dos Santos. “*Implementação de FBGs para sistemas de comunicação em fibra óptica*”. Dissertação de final de curso, Universidade de Aveiro, 2008.

- [3] Turan Erdogan. “*Fiber grating spectra*”. Journal of Lightwave Technology, 15(8):1277-1294, August 1997.

- [4] Mário J. N.Lima, António L. J. Teixeira, O. Frazão, Paulo S. B. André, J. R. Ferreira da Rocha. “*Redes de Bragg para Telecomunicações*”

- [5] Miguel Vidal Drummond. “*Implementation of the Stitching method for a FBG writing system*”, Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, 2008. (não publicado)

- [6] Johannes Skaar, Ligang Wang, and Turan Erdogan. “*On the Synthesis of Fiber Bragg Gratings by Layer Peeling*”. IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 37, No. 2, 2001.

- [7] Marco Molon. *“Sviluppo di modelli matematici ed algoritmi numerici per la progettazione di dispositivi ottici basati su strutture dielettriche periodiche monodimensionali”*. Università degli Studi Roma Tre, Facoltà di Ingegneria, 2006.
- [8] Mário Lima. *“Optimização de sistemas de comunicação baseados na tecnologia WDM”*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2003.